



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus-ja maaehitusinstituut

Tauno Truuts

**TERASKIU JA BETOONI VAHELISE NAKKETUGEVUSE
UURIMINE**

**INVESTIGATION OF ADHESION STRENGTH BETWEEN
STEEL FIBRE AND CONCRETE**

Magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: dotsent Alexander Ryabchikov, PhD

Tartu 2018

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase matrikli number: 100786

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Tauno Truuts		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Teraskiu ja betooni vahelise nakketugevuse uurimine			
Lehekülgi: 58	Jooniseid: 34	Tabeleid: 10	Lisasid: 8
Osakond/Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERCS-i kood:		Tehnikateadused: T220, T230	
Juhendaja(d):		dotsent Alexander Ryabchikov	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Kiudbetoon on komposiitmaterjal, mis koosneb betoonist ja kiududest. Seda kasutatakse põranda konstruktsioonides, kuid tänapäeva tehnoloogia areng võimaldab kiudbetooni kasutada ka vundamentides, kandvates seintes ning vahelagedes. Betooni omaduste parandamiseks võib selles kasutada klaaskiudusid, süsinikkiudusid ning sünteetilisi kiude. Käesolev magistritöös uuritakse kahe teraskiu XP 75/62 ja HE 75/52 nakkeomadusi. Magistritöö eesmärgiks on määrata ühe teraskiu nakkeomadusi kahes erineva tugevusklassiga betoonis. Töö käigus teostatakse üksikute teraskiudude betoonist väljatõmbekatseid. Kiudusid katsetatakse erinevate tugevusklassidega betoonides C25/30 ja C35/45. Samuti katsetatakse kiude kahe betoonkeha vahelise kokkupuute pinna suhtes nii 90 kraadise kui ka 70 kraadise nurga all, saamaks aru, kui palju mõjutab kiudude asetus teraskiu väljatõmbetugevust. Katsete läbiviimiseks projekteeriti ja valmistati spetsiaalsed metallist haaratsid. Teraskiudude katsetamise eelselt viidi läbi betooni survetugevuse katsed, määramaks betooni tugevusklassi. Teraskiudude nakketugevuse uurimiseks valmistati 80 katsekeha, mis asetati tõmbetugevuse masina Instron 3369 küljes olevate spetsiaalsete metallist haaratsite vahele. Lisaks väljatõmbetugevusele mõõdeti ka toimunud siirdeid.</p> <p>Katsetulemused näitasid, et teraskiu nakketugevust mõjutab betooni tugevusklass, teraskiu kuju ning kiu asetus kahe betoonkeha kokkupuute pinna suhtest. Katsete käigus esines koormamise hetkel nurga all olevate teraskiudude purunemist. Ühe teraskiu nakketugevuse uurimiseks tuleks teostada täiendavaid katseid. Edaspidisel uurimisel võib suurendada katsete hulka, laiendada teraskiudude valikut ning kasutada betooni tugevusklassi.</p>			
Märksõnad: betoon, teraskiud, nakketugevus			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Professional Higer Education Thesis	
Author: Tauno Truuts		Curriculum: Civil Engineering (Rural Building), 382	
Title: Investigation of adhesion strength between steel fibre and concrete			
Pages: 58	Figures: 34	Tables: 10	Appendixes: 8
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERCS) code:		Technological Sciences: T220,T230	
Supervisors:		Associate Professor Alexander Ryabchikov	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>Fiber reinforced concrete is a composite material, which consist of concrete and fibers. This material is widely used in floor construction but also used in foundations, in bearing walls and ceilings. In aim to improve certain properties of concrete the other types of fibers like fiberglass, carbon fibers and synthetic fibers can be used as well.</p> <p>The present Master's thesis examines the adhesion properties of the two steel fibres XP 75/62 and HE 75/52. The aim of this Master's thesis is to study the adhesion properties of one steel fibre in two concrete of different strength classes C25/30 and C35/45. In the course of the work individual steel fibre pull-out tests were carried out. It is also tested if the angle of the steel fiber connection effects the connection strength of the two concrete blocks. Two different steel fibre connection angles were used: 70 degrees and 90 degrees.Special metal grips were designed and manufactured for carry out experiments. To determine the strength classes of concrete, the concrete compressive strength tests were carried out. To study the adhesion between steel fibre and concrete strength of steel fibres, the 80 test specimens were prepared. The test pieces were placed between special metal hooks, which are pre-mounted on the Instron 3369 tensile strength machine. In addition to pull-out strength the displacements were also measured. The test results showed that the concrete strength class, steel fibre shape and fibre placement in the concrete at the moment of loading is affecting the adhesion strength of the steel fibre. Fractures occured on the steel fibre which were incline to the axis of loading as a result of this experiment. Additional tests are needed while studying the adhesion strength of the individual steel fibre. For further investigations, the tests should be increased, likewise, the choice of steel fibres should be expanded, using a concrete strength classes.</p>			
Keywords: steel fiber, concrete, pull-out strength,			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	7
1.1. Betooni ja kiudbetooni ajalugu	7
1.1.1. Betooni omadused ja eripära	9
1.1.2. Betooni eelised ja puudused	11
1.2. Kiudbetooni ajalugu, tüübid ja kasutusvaldkonnad	12
1.2.1. Teraskiud.....	13
1.2.2. Klaaskiud.....	15
1.2.3. Süsinikkiud.....	15
1.2.4. Sünteetilised polümeerkiud	16
1.3. Kiudbetooni eelised ja puudused.....	17
1.4. Ülevaade varem teostatud uurimistöödest.....	18
1.5. Magistritöö eesmärgid ja ülesanded	21
2. TERASKIUDUDE JA BETOONI VAHELISE NAKKETUGEVUSE UURIMINE.....	23
2.1. Katsemetoodikad.....	23
2.1.1. Tõmbekatse meetodika	25
2.1.2. Survekatse meetodika	26
2.2. Seadmed ja vahendid.....	27
2.2.1. Proovikeha haaratsi projekteerimine ja valmistamine.....	27
2.2.2. Väljatõmbe katsekehade vormide projekteerimine ja valmistamine.....	28
2.2.3. Betoonkehade valmistamine	30
2.2.4. Survekatseseade	32
2.2.5. Tõmbekatseseade	33
2.3. Katsekehade valmistamine.....	34
2.3.1. Survekatsekehade valmistamine.....	34
2.4. Tõmbekatsekehade valmistamine.....	37
2.5. Katsete käik	41
3. UURIMISTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU.....	43
3.1. Survekatse tulemused.....	43
3.2. Teraskiu väljatõmbekatse tulemused.....	44
3.2.1. Kiu XP 75/62 väljatõmbekatse tulemused	44
3.2.2. Kiu HE75/52 väljatõmbekatse tulemused	45
3.3. XP 75/62 ja HE 75/52 kiudude väljatõmbejõu ning nakketugevuse võrdlus ja arutelu ...	46
3.4. Katsetulemuste korrelatsioon	47
3.5. Regressioonianalüüs.....	48
KOKKUVÕTE.....	50
KASUTATUD KIRJANDUS	52
Lisa 1. Katse tulemused	55
Lisa 2. Proovikeha haaratsi tootejoonis.....	56
Lisa 3. Proovikeha vormi tootejoonis	57
Lisa 4. Teraskiu asetuse skeem betoonis.....	58
Lisa 5. Teraskiu XP 75/62 katsete tulemused	59
Lisa 6. Teraskiu HE 75/52 katsete tulemused	60
Lisa 7. Regressioonianalüüs.....	61

SISSEJUHATUS

Tänapäeva kiire tehnoloogia areng võimaldab kiudbetooni ehituses üha enam kasutada. Peamiselt kasutatakse kiudbetooni põrandates, kuid materjal on leidnud kasutust ka kandvates vahelaekonstruktsioonides, vundamentides ning seinakonstruktsioonides. Kiudbetoon on komposiitmaterjal, mis koosneb tehiskivi sisse segatud kiududest. Kiudbetoonis kasutatavad kiud erinevad kujult, pikkuselt, läbimõõdult ning materjali poolest. Sellest lähtuvalt varieeruvad ka kiudbetooni omadused.

Käesolevas magistritöös uuritakse kahe erineva üksiku teraskiu nakkeomadusi betoonist väljatõmbekatsete sooritamisel. Kasutatavad teraskiud on läbimõõdult ning tõmbetugevuselt võrdsed, kuid kiudude pikkused jaujud on erinevad. Üksikuid kiudusid katsetatakse kahes erineva tugevusklassiga betoonis, selgitamaks betooni tugevust ning kiudude ankurduskuju mõju kiudude nakketugevusele. Teraskiud paigaldatakse proovikeha sisse piki proovikehale rakendatavat koormuse telge. Ühtlasi paigaldatakse teraskiudusid proovikeha sisse 70 kraadise nurga alla mõõdetuna kahe betoonkeha kokkupuute pinnast. Katsega soovitakse välja selgitada, kui palju mõjutab kiudude asetus nakketugevust. Veendumaks betooni tugevusklasside sobivuses, teostatakse töös kasutatavale betoonile survetugevuskatsed.

Magistritöö esimeses peatükis antakse ülevaate varem tehtud uurimustöödest, betooni ning kiudbetooni ajaloost. Välja on toodud olulised faktid ajaloost ning suuremad ja tuntumad ehitised betoonist ja kiudbetoonist. Tutvustatakse kiudbetoonis kasutatavad erinevad kiudusid ning nende valmistamise tehnoloogiat. Püstitatakse uurimistöö eesmärgid. Teises peatükis uuritakse teraskiu ja betooni vahelist nakketugevust. Selleks selgitatakse katsemetoodikat, katsekehade ja -vahendite valmistamist ning katsete käiku. Kolmandas peatükis esitatakse katsetulemusi, analüüsitakse ja tehakse järeldusi.

Autor tänab käesolevas magistritöös Argo Põldojat OÜ-st Betotrade, kes tarnis vajaminevad teraskiud ning oli abiks magistritöö eesmärkide selgitamisel. Samuti tänab töö autor Tanel Kõivupuud OÜ-st Tahel Metall, kellega koostöös töötati välja ning valmistati katsetamiseks vajalikud haaratsid. Urmas Paasi ja Argo Viidingut OÜ-st TMB Element, kellelt saadi magistritööks vajalik betooni materjal ning kus valmisid katsekehad ning puidutislerit Ivo Kütti, kes valmistas katsekehade vormid.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Betooni ja kiudbetooni ajalugu

Inimkonna ajalugu on läbi aegade olnud seotud ehitamisega. Seda kinnitavad säilinud arvukad ehitised või nende alles jäänud osad. Ligi 800 000 aastat tagasi õpiti tundma algeliselt looduslike kivimeid ning nende esmast töötlemist [1]. Pika ajaloo vältel on inimkonna vajadused olnud pidevalt muutumises ning järjest kasvanud. Kogemuste ning uurimiste tulemusena on jõutud arusaamisele, et looduslikel kivimitel esineb ka palju puudusi nagu näiteks pragunemine, töödeldavus, transport [1]. Nimetatud probleemidele on otsitud lahendusi ning vajadusest tulenevalt on hakatud kive ise tootma [1]. Inimese poolt valmistatud kivimit nimetatakse tehiskivimiks ning üheks selliseks on betoon. Betoon on tänapäeval üks olulisemaid ehitusmaterjale, mille kasutusvaldkonnale on järjest vähem piire.

Esimesed teadaolevad oskused betooni kirjeldavast materjali valmistamisest pärinevad Vana-Rooma aegadest enne Kristuse sündi. Sellel ajajärgul koosnes betoon peamiselt lubjast, vulkaanilisest tuhast, purustatud keraamikast või tellistest. Sellistest täite- ja sidematerjalidest koosnevat betoonisarnast segu kasutati veel tänapäeval säilivatel ajaloolistel suurehitiste rajamisel. Sõna „betoon“ on ajaloost esimest korda nimetatud aastal 1753. Tänapäeval peetakse üheks vanimaks teadaolevaks betooni leiuks Ida-Siberia Lepenski Viri'st jahionni põrandat, mille dateeringuks on märgitud ligikaudu 5600 aastat enne Kristuse sündi. Tänapäeval veel kasutusel olev vanim betoonehitis on Rooma Pantheon (Joonis 1.1), mille ehitust alustati 27 aastat enne Kristuse sündi. Hoone üheks olulisemaks omaduseks sellel aja järgul oli see, et hoone püstitamisel kasutati ka nn kergbetooni.[2]



Joonis 1.1. Rooma Pantheon [3].

Eestis ulatub betooni ajalugu aastasse 1860 [4]. Sellest ajast on pärit esimesed betoonehitised Eestis näiteks Tallinnas Harju värava juures paiknev betoontrepp. Sellel ajal imporditi Eestisse tsement, mis on üks betooni olulisemaid komponente [4]. Alles kümme aastat hiljem saadi aru, et ka Eestis on vajaminevad komponendid olemas ning suur nõudlus tingis ka esimese tsemenditehase rajamise Kundasse aastal 1870 [4]. Üks suuremaid ja nii Eestis kui ka mujal Euroopas tuntud betoonehitis on Tallinnas lennusaadamas paiknev vesilennukite angaar (Joonis 1.2) [5].



Joonis 1.2 Vesilennukite angaar [6]

Betoonil kui ehitusmaterjalil on nii plusse kui miinuseid. Üheks miinuseks on kindlasti betooni madal tõmbetugevus. Sellele negatiivsele omadusele hakati otsima lahendusi, kuidas muuta betoon vastuvõtvamaks tõmbetugevusele [7]. 19. sajandil jõuti tulemuseni, et ühendades betoon ja teras, saadakse materjal, mis võtab vastu suurt survetugevust, kui ka töötab hästi tõmbetugevusele [8]. Selle materjali tekkimise eelduseks oli 1850. aastal tehnoloogiline areng, mis võimaldas toota valtsierast ning portlandtsementi [9]. Maailmas peetakse esimeseks betoonist ja terasest ehitatud konstruktsiooniks 1850. aastal valminud Lamboti paat (Joonis 1.3) [9]. Lisaks valtsitud terasele on võimalus betooni tõmbetugevust suurendada erinevate kiududega. Sellist komposiitmaterjali, mis koosneb kiududest ja betoonist, nimetatakse kiudbetooniks.

1.1.1. Betooni omadused ja eripära

Betoon on tehismaterjal, mida valmistatakse sideaine, vee ja täitematerjali omavahelisel täpselt määratud vahekorras kokkusegamisel ja hilisemal kivinemise protsessil [10]. Materjali struktuuri vaadates on betoon ebaühtlase ehitusega. Sideaine tsemendi ja vee

omavahelisel segamisel saadud tsementkivimi tühimikke täidab täitematerjalide (kruus, killustik liiv) osakesed [9].

Betooni on võimalik liigitada koostise ja omaduste põhjal järgmiselt [9]:

- täitematerjali põhjal;
- sideaine põhjal;
- mahumassi põhjal;
- kasutusvaldkondade põhjal;
- struktuuri põhjal;
- täitematerjali osakeste suuruste põhjal;
- kivistumistingimuste põhjal.

Tsementkivimis leiavad aset mitmed hilisemad reaktsioonid. Näiteks materjalis oleva vee hulk väheneb ja tugevneb materjali kristallvõre [11]. Need materjalisisesed muutused on peamisteks põhjusteks betooni mahukahanemisele ja tugevuse kasvamisele [12]. Mahukahanemine toimub betoonis varajases kivistumise faasis [9]. Konstruktsioonile kui tervikule on mahukahanemine kahjulik tekitades pragusid. Mahukahanemise peamised ohu faktorid on kõrge vesitsementtegur betoonis. Lisaks liiga suur tsemendi kogus või liiga suur peeneteralise täitematerjali kogus [9].

Igal materjalil on omadused, mille järgi saab hinnata tema kvaliteeti. Betooni omadusteks on külmakindlus, veetihedus, deformatsioonid ja kulumiskindlus, mille põhjal võib määratleda betooni kvaliteeti [13]. Betooni omadus, võtta vastu suurt survetugevust, on üheks põhiliseks kvaliteedi näitajaks antud materjali puhul. Konstruktsioonide projekteerimisel lähtutakse betooni valikul tema klassidest ja markidest [9]. Betooniklasse määratakse 95 protsendilise tõenäosusega silindrilise ja kuubikulise katsekehade tugevusomaduste katsetamisel 28 päeva vanuselt [9]. Betooni omadused, nagu veetihedus ja külmakindlus, määratakse keskmiste tulemuste järgi [9]. Tugevusomadusi mõjutavad betooni ümbritsev keskkond. Mida niiskemas keskkonnas on materjal kivistumise faasis, seda suuremaks muutuvad tugevusnäitajad [9]. Tugevuse saavutamisele aitavad kaasa ka termilised protsessid. Selleks võib eelsoojendada täitematerjali või tõsta ümbritseva keskkonna temperatuuri. Tehiskivi tugevusomaduste saavutamist on võimalik hinnata ligikaudselt tabelist 1.1, jälgides kivistumise ajafaktorit ning materjali temperatuuri [12].

Tabel 1.1. Betooni suhteline tugevus, olenevalt kivistumise ajast ja temperatuurist (%-des normtugevusest) [12]

Kivistumise kestvus päevades	Kivistumise temperatuur C°				
	5	10	15	25	35
3	15	20	30	37	45
7	3	44	60	70	72
15	55	65	80	85	85
28	80	92	100	105	105

Liiga varane betooni dünaamiline koormamine vähendab kivistumisel saavutatavaid tugevusomadusi [9]. Lisaks peab talvisel perioodil vältima betooni varajast läbikülmumist. Varajasel läbikülmumisel betoonis olevad vee molekulid jäätuvad ja paisuvad ning kui betoon pole saavutanud tugevusomadusi, mis peaksid vastu vee molekulide paisumisele, tekivad betoonis pinged, mille tulemusena betoon puruneb [9]. Selle vältimiseks peab olema betoon saavutanud enne läbikülmumist tugevuse 5 MPa [9].

1.1.2. Betooni eelised ja puudused

Tänapäeval on betoon üks põhilistest ehitusmaterjalidest. Betooni kasutatakse vundamentide, soklite, kandekonstruktsioonide, põrandate, seinte, treppide, vahelagede jne valmistamisel. Betoonil on võrreldes paljude teiste ehitusmaterjalidega hulgaliselt eeliseid [14;9]:

- suur survetugevus;
- võimalik muuta tekstuuri ja tooni;
- hinnaklassilt soodsam kui looduskivimid;
- looduskivimitega võrreldes vajab vähem hooldust;
- hästi töödeldav ning vormitav;
- head nakkeomadused armatuuriga;
- betoon kaitseb armatuuri korrosiooni eest.

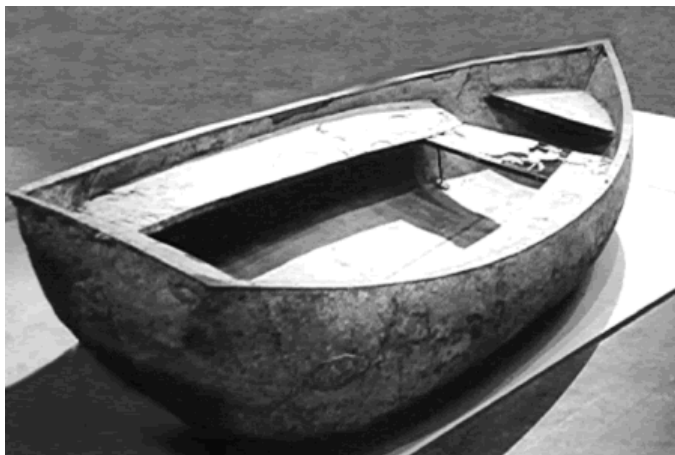
Betooni suureks plussiks on asjaolu, et materjali soojuspaisumise tegurid on võrreldes terasega samad, mis teeb võimalikuks terase kasutamise betoonis armeeriva materjalina tõmbepingete vastuvõtmiseks [9]. Paraku ei ole olemas materjali, millele ei esineks puudusi. Nii esineb ka betoonil puudusi, milleks on [9]:

- suur erikaal, mis teeb betoonist ühe raskeima materjali;
- ajas mahukahanemine ning pragude tekkimine;
- monoliitsete konstruktsioonide kõrge hind;
- väike tõmbetugevus.

Betooni üheks puuduseks võib pidada ka seda, et betoneerides monoliitseid konstruktsioone temperatuuril null kraadi ja alla selle, betooni kividamine aeglustub või toimub läbikülmumine [15]. Selle vältimiseks tuleb kasutada vastavaid abinõusid. Näiteks soojendada betoonisegu, tagada ümbritsevas keskkonnas positiivne temperatuur ehitades telke, soojendades armatuuri, kasutades külmakindlaid lisandeid jne.

1.2. Kiudbetooni ajalugu, tüübid ja kasutusvaldkonnad

Teadaolevalt ulatub kiudbetooni ajalugu 3500 aastat tagasi Mesopotaamiasse, kus kasutati plokkide valmistamisel õlgi. Lisaks õlgedel kasutati mõrdi valmistamisel ka hobusekarvu.



Joonis 1.3. Lamboti paat [16].

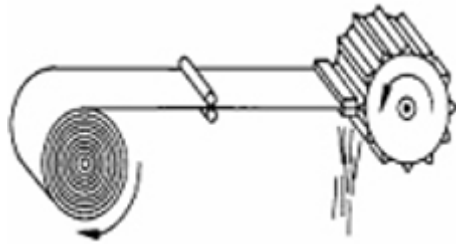
Teras- ja klaaskiud on leidnud laialdasemat kasutust viimasel 30.-40. aastal. Teraskiuga betooni hakati katsetama aastal 1910, kus tänapäeval kasutatavate kiudude asemel prooviti kasutada naelu ja metallilaaste. Alles 1960. aastal pöörati USA-s suuremat tähelepanu kiudbetoonile, eesmärgiks saavutada militaarsetel lennuradadel suurem löögitugevus. Kümme aastat hiljem

saavutati läbimurre kiudbetooni ajaloos. Nimelt töötati välja teraskiud, mis suurendasid paindetõmbetugevust kui ka piirasid pragude avanemist. Tänapäeval kasutatakse kiudbetooni laialdaselt ka tsiviilehituses.[7]

1.2.1. Teraskiud

Teraskiud jagunevad valmistamise tehnoloogia järgi kolme rühma [17]:

1. Kiud lõigatakse välja teraslehest ning seejärel vormitakse kasutamiseks (Joonis 1.4.)



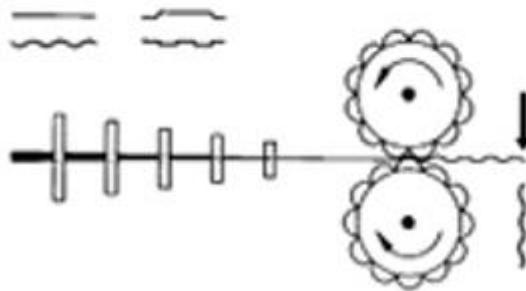
Joonis 1.4. Metallehest lõikamine [18].

2. Kiud freesitakse välja terasplaadist (Joonis 1.5.)



Joonis 1.5. Freesimine [18].

3. Kiud tõmmatakse külmalt tõmmatud traadist (Joonis 1.6.)



Joonis 1.6. Traadist tõmbamine [18].

Teraskiud on oma kujult erinevad ning pikkused ulatuvad kuni 70 millimeetrini (joonis 1.7.) [18]. Teraskiududel neli põhilist näitajat [19]:

- kiudude tõmbetugevus - mida suurem on kiu tõmbetugevus, seda suurema tugevusega on ka kiudbetooni tugevusklass;
- kiudude pikkus - mida pikem kiud, seda parem nakke betooniga;
- kiudude hulk betoonis;
- kiudude segunemine betoonis - kiudude segamisel tuleb vältida nn siilide teket ehk kiududest segamise ajal moodustunud palle.

Enamjaolt kasutatakse Eestis külmalt tõmmatud kiudusid, kuid kasutatakse veel ka galvaniseeritud ja roostevabast terasest valmistatud kiudusid [18].



Joonis 1.7. Erinevad teraskiud [18].

1.2.2. Klaaskiud

Klaaskiudusid toodetakse leelisekindlast klaasist ning seega kasutatakse neid peamiselt leeliselistes keskkondades [19]. Kiudude leelisekindlus sõltub suurel määral tooraines



Joonis 1.8. Klaaskiud [18].

sisalduva tsirkooniumoksiidi kogusest [20]. Mida suurem on tsirkooniumoksiidi sisaldus, seda parem leelisekindlus on kiududel [20]. Kiudude pikkused varieeruvad vahemikus 3 kuni 30 millimeetrit. (joonis 1.8.) [20].

Klaasikiududel on hea omadus vähendada mahukahanemisest tekkinud pragusid. Samuti

kasutatakse neid laialdaselt konstruktsioonides, kus on vaja tagada dielektriline juhtivus. Paljud kuivsegud, nagu näiteks pahtlid ja põrandasegud, sisaldavad klaaskiudu, [20].

1.2.3. Süsinikkiud

Süsinikkiud moodustub peamiselt süsinike aatomitest, mis on põimunud kristallilisteks domeenideks [21]. Tooraineks kasutatakse näiteks tselluloosi, pigi, ligniini või polüaktiidi [21]. Süsinikkiududel on väike mass, kuid suur tugevus [21]. Seega kasutatakse neid kohtades, kus on vaja saada materjalil väiksemat kaalu. Lisaks suurele tugevusele ja väiksele massile on süsinikkiud väga head vibratsiooni summutid, oksüdeerumiskindlad ning vastupidavad keemilistele reaktsioonidele [22]. Süsinikkiud on toodud joonisel 1.9.



Joonis 1.9. Süsinikkiud [17].

1.2.4. Sünteetilised polümeerkiud

Betoonis kasutatavatel sünteetilistel kiududel (joonis 1.10) on mitmeid häid omadusi. Sünteetilised kiud suurendavad tõmbetugevust varajastes betooni kivistumise staadiumis [17]. Suur kiudude arv betoonis tõstab betooni tihedust, vähendades seeläbi poorsust ning parandades vee läbilaskvust [17]. Betoonis tekivad peale valamist ühe kuni kahe tunni jooksul plastilised mahukahanemise praod. Sünteetilised kiud on head vältimaks mahukahanemispragude teket. Kiudude pikkuseid on erinevaid, kuid peamiselt kasutatakse kiudusid pikkusega 12 mm [22].



Joonis 1.10. Sünteetilised polümeerkiud [17].

1.3. Kiudbetooni eelised ja puudused

Kiudude ning betooni omavahelisel segamisel tekib komposiitmaterjal, mida nimetatakse kiudbetooniks. Materjalide ühendamisel kompenseerivad kaks erinevat materjali üksteise puudusi. Kiud parandavad betoonitõmbetsoonis nõrka vastupanu tõmbetugevusele ning betoon tagab komposiitmaterjali parema survetugevuse [18]. Lisaks betooni põhilistele omadustele, nagu survetugevus, külmakindlus ja keskkonnaklass, eristatakse kiudbetooni ka kiudude materjali järgi. Kiudude jaotus materjali järgi on järgmine [17]:

- teraskiud;
- klaaskiud;
- sünteetilised kiud;
- süsinikkiud.

Viimase 20.-30. aasta vältel on toimunud suured muudatused Eesti ehitusprotsessis. Tehnoloogia areng on lihtsustanud ehituses teostavaid tööoperatsioone. Lisaks on võetud kasutusele hulgaliselt uusi materjale, mis on avaldanud olulist mõju kvaliteedile, kulutustele ning ehitiste valmimise tähtaegadele. Tänapäeval on tellijatele oluline hoone kiire, soodne ja kvaliteetne valmimine. Kiudbetoonil on mitmeid nii majanduslike kui ka materjali omadustest lähtuvaid eeliseid [18]:

- mahukahanemispragude vähenemine;
- armeerimise tööloigu puudumine;
- projekteerimisele tehtavate kulutuste ja ajalise faktori vähenemine;
- talvistel betoneerimistel armeeringute sulatamiseks või soojendamiseks tehtavate kulutuste puudumine;
- kvalifitseeritud tööjõu vajaduse vähenemine;
- ehitusprotsessi lihtsustamine metalli tarnete, tõstmiste, painutamise, lõikamis- ning paigaldamistööde poolest;
- betooni suurem löögikindlus;
- madalamad riskid valesti armeerimisel, kogu ristlõige kiudbetooni puhul ühtlaselt armeeritud.

Kiudbetoonil esinevad puudused on järgmised [18]:

- kiudbetooni pumpamisel kiusisaldus üle 35 kg/m³ tekib voolikutes ummistuste oht. Pumpamise asemel soovitatakse kasutada renni;
- kiudude ebaühtlane jagunemine betoonis madala kiusisalduse puhul;
- puhta pinnaviimistlusega põrandatel kiudude nähtavale jäämine;
- liigsel pikaajalisel vibreerimisel kiudude vajumine konstruktsiooni alumistesse kihtidesse;
- kiudbetooni segamine nõuab automaatseid dosaatoreid, vältimaks inimlikke eksimusi.

Kiudbetooni kasutatakse peamiselt põrandates, kuid üha enam kasutatakse seda komposiitmaterjali tööde lihtsustamise mõttes ka vundamentides, seintes ning vahelagedes. Ligi 90 % Eestis valatavatest põrandatest tehakse kiudbetooniga [18]. Tavaliselt kasutatakse just teraskiudu, kuid vajadusel ka klaas- ja plastikkiudusid. Kiudbetoonkonstruktsioonide projekteerimisel ja valmistamisel peavad tellijad, projekteerijad ning ehitajad tegema omavahel tihedat koostööd, selgitamaks, kas projekteeritavat konstruktsiooni on võimalik teostada kiudbetooniga.

1.4. Ülevaade varem teostatud uurimistöödest

Käesolevas peatükis antakse ülevaade teraskiudbetooni kiudude katsetamisest Eestis ja mujal maailmas. Kirjandust uurides on kiudbetooni kohta tehtud väga palju uurimusi nii Eestis kui ka välismaal. Uuritakse peamiselt kiudbetooni erinevaid tugevusi, kuid on tehtud ka uurimusi betoonis kasutatavatest erinevatest kiududest ja nende omadustest. Eestis ei ole avaldatud infot ühe teraskiu katsetuste kohta, millest võib järeldada, et Eestis pole üksikut teraskiudu katsetatud. Käesoleva lõputöö autori arvates saab ühte teraskiudu betoonis katsetades kõige täpsema info teraskiu omaduste ja seoste kohta betoonis. Eestis on küll varem uuritud erinevate teraskiudude kuju ja omaduste mõju paindetugevusele, kuid seejuures on katsed läbiviidud kasutades ühes katsekehas rohkem kiudu kui üks [23]. Lähim uurimistöö ühe kiu väljatõmbamise kohta betoonist on teostatud Eesti naaberriigis Lätis [24], kuid sealses töös jääb suures osas infot puudu järelduste tegemiseks.

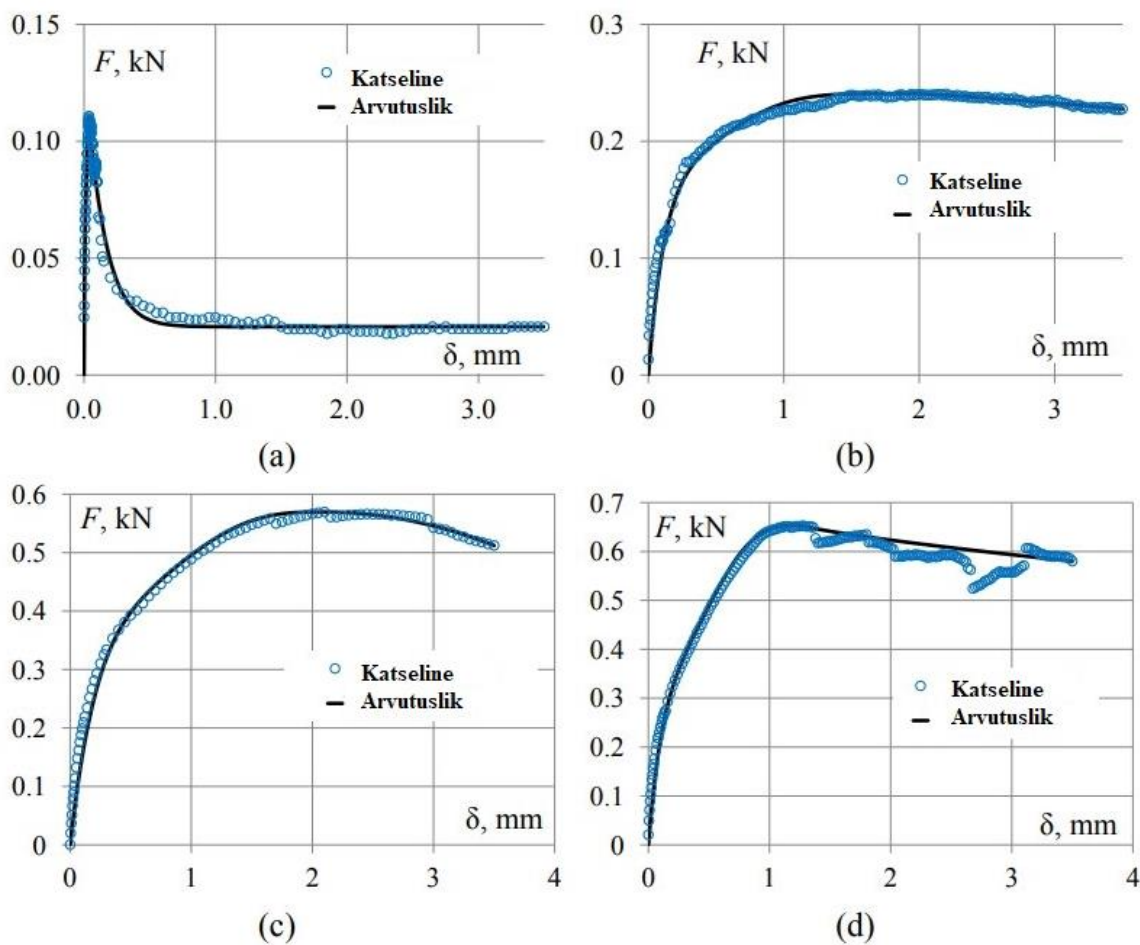
Järgnvalt antakse ülevaade Eestis teostatud uurimistööst teraskiudude omaduste uurimisest betoonelementide paindetugevusele. Töö eesmärgina uuriti, milline mõju on erinevate teraskiududel kiudbetoonelementide paindetugevusele, milline kiudude omadus mõjutab seda kõige enam ning kas mõni kiudude omadus mõjutab ka nende paiknemist betoonis. Magistritöös [23] kokku valmistati 36 katsekeha, millest 18 olid kuubikud ja üle jäänud 18 silindrilised plaadid läbimõõduga 800 mm. Töös kasutati viite erinevat teraskiudu ning lisana tehti veel katseid teraskiu ja basaltkiu koosmõjul.

Kasutatud kiud [23]:

- HE 1/60;
- HE 1/50;
- HE 75/50;
- Tabix 90/35;
- Xorex 50;
- HE 75/50+ basalt.

Määramaks betooni survetugevust, teostati betooni survetugevuse katsed. Uurimise käigus valiti betoon tugevusklassiga C35/45. Töö tulemusena saadi teada, et kõige enam mõjutab betoonelementide paindetugevust kiudude pikkus. Kiudude jagunemist betoonis mõjutab kõige rohkem kiudude saledus [23].

Järgnevalt antakse lühiülevaade Lätis teostatud uurimistöö ühe teraskiu katsetamise kohta. Uurimistöös teostati neljale erinevale teraskiule betoonist väljatõmbetestid. Töös kirjeldatakse kiudusid, kuid ei anta täpseid marke ega tooda välja pilte kiududest. Nelja erinevat kiudu jagatakse kui sirged, konksuga, lainelised ning pressitud otsaga kiud. Kiudusid katsetati nelja erineva kaldenurga all (0, 30, 35 ja 60 kraadi) koormuse mõjumise sihi suhtes ning kiud olid erinevate läbimõõtude ja pikkustega. Väljatõmbekatse tulemused näitavad, et kiudude liikidel on suur mõju betoonist väljatõmbetugevusele. [24]



*Märkused: a) sirged kiud, b) konksudega kiud; c) lainelised kiud; d) pressitud otsaga kiud

Joonis 1.11. Väljatõmbekatse tulemused erinevate kiududega [24].

Joonis 1.11 kajastab erinevate kiudude katsetusi erinevate kaldenurkadega [24]. Kahjuks pole töö autor toonud selgelt välja kui palju katsete seeriaid on teostatud ning milline on katsekehade arv seerias. Töös ei leia kajastamist ka kasutatava betooni koostist ning kiudude tehnilised näitajad. Joonist 1.11 vaadates on näha, et erinevate kiudude väljatõmbejõud on erinevad.

Täpsem ülevaade ühe teraskiu uurimusest on koostatud Saudi Araabias. Töös uuritakse ühte teraskiudu Dramix läbimõõduga 0,75 mm, pikkusega 50 mm ning tõmbetugevusega 1100 MPa. Antud töös on ära toodud ka täpne betooni koostis ning betooni tugevus, milleks on



Joonis 1.12. Väljatõmbetest [25]

40,1 MPa. Katsete läbiviimiseks on valmistatud spetsiaalsed haaratsid, mida on näha joonisel 1.12. Vastavalt haaratsite kujule on valatud betoonkeha, mis koosneb kahest osast ning kahte betoonkeha ühendavad omavahel teraskiud. Teraskiud on asetatud betooni sisse erinevate ankurduspikkustega. Vaadates katsete tulemusi (lisa 1) on näha, et kõige suurem tulemus 500N on saavutatud

ankurduspikkusega 50% kiu kogupikkusest. Testide tulemuste põhjal järeldati, et teraskiu nakketugevus sõltub kiu ankurduspikkusest. [25]

1.5. Magistritöö eesmärgid ja ülesanded.

Magistritöö eesmärgiks on uurida kahe kujult ja pikkuselt erineva üksiku teraskiu nakkeomadusi madalama ning kõrgema tugevusklassiga betooni vahel. Töö tulemusena soovitakse selgitada, kui suur jõudude erinevus on kahe erineva kiu väljatõmbamisel sama tugevusklassiga betoonist. Sealjuures kiudude läbimõõdud ning materjali omadused on mõlemal kiul samad. Uurimistöö käigus selgitatakse välja, kas ja kui palju mõjutab betooni tugevusklass üksiku teraskiu nakketugevust.

Magistritöö eesmärkide saavutamiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

- 1) teostada kirjanduse analüüs ning uurida varem teostatud uurimistöid;
- 2) töötada välja katsemetoodikad, võttes aluseks varem teostatuid uurimistöid;
- 3) töötada välja teraskiu tõmbetugevuse uurimiseks betoonkehade kuju;
- 4) projekteerida ja valmistada vastavalt betoonkeha kujule spetsiaalsed haaratsid tõmbekatsete läbiviimiseks;
- 5) projekteerida ja valmistada vastavalt tõmbekatse kehade kujule vormid;

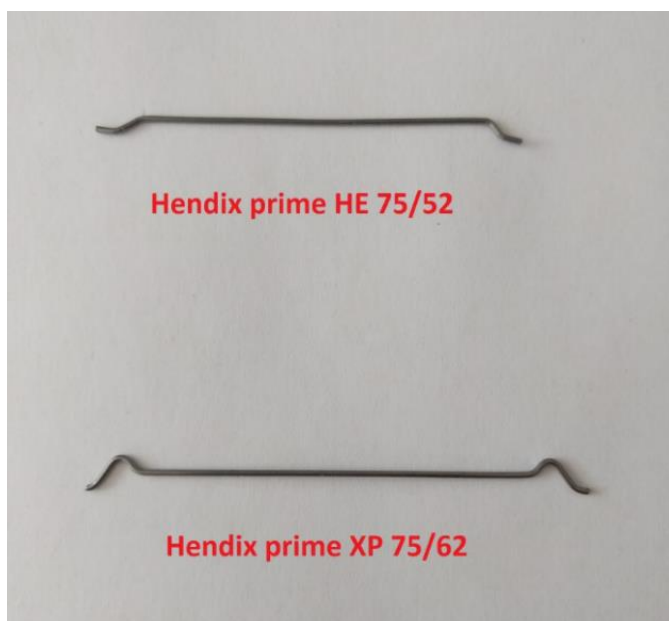
- 6) valmistada survekatsekehad ning nakketugevuse uurimiseks katsekehad;
- 7) teostatakse betooni klasside määramiseks betooni survekatsed;
- 8) teostada teraskiudude väljatõmbekatsed;
- 9) analüüsitakse saadud tulemusi ja tehakse järeldusi.

Magistritöö eesmärkide saavutamisel tehti koostööd Eesti suurima teraskiudude maaletooja ettevõttega Betotrade OÜ. Betooni retseptide alal konsulteeriti betoonelemente tootva ettevõttega OÜ TMB Element. Proovikehad valati OÜ TMB Element ruumides.

2. TERASKIUDUDE JA BETOONI VAHELISE NAKKETUGEVUSE UURIMINE

2.1. Katsemetoodikad

Magistritöö eesmärgiks oli uurida teraskiudude nakkeomadusi betoonis. Kiudude valikul tehti koostööd Eesti enim teraskiude maaletootva ettevõttega Betotrade OÜ. Valik langetati kiudude Hendix prime HE 75/52 ja Hendix prime XP 75/62 kasuks (joonis 2.1.).



Joonis 2.1. Töös katsetatud teraskiud.

Teraskiududel on nii ühiseid kui ka teineteisest erinevaid omadusi. Kiudude läbimõõt, tõmbetugevus ning sile profileering on mõlemal tüübil sama. Erinevus seisneb kahe teraskiu pikkuses, ankurduspikkuses kui ka kiudude geomeetrias. Töös kasutatavate kiudude tehnilised näitajad on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Kiudude tüübid [26;27]

Kiu tüübid	Läbimõõt d mm	Pikkus L mm	Ankurduspikkus y mm	Ankurduskõrgus H mm	Tõmbetugevus N/mm ²
Hendix prime HE 75/52	0,75±0,04	52±2,0	2,1-1,0/+2,0	2,1+0,5/-0,0	1500
Hendix prime XP 75/62	0,75±0,04	62±2,0	6,9±1,0	4,0+0,1/-0,3	1500

Koostöös Betotrade OÜ-ga lähtuti betoonklasside valikul eeldusest luua nakkeomadustest korrelatsioon kiudbetooni puhul kasutatavate madala betooni tugevusklassi C25/30 ja kõrgema betooni tugevusklassi C35/45 vahel. Betooni retseptid töötati välja koostöös OÜ-ga TMB Element. Seal valmistati ka magistritööks kõik vajalikud katsekehad. Kahjuks puudub OÜ-l TMB Element madala tugevusklassiga betooni margi valmistamise kogemus, sellepärast, et kõik kandevkonstruktsioonis kasutavaid betoonelemendid valmistatakse kõrgema betooni tugevusklassiga kui C25/30. Madala tugevusklassiga betooni puhul C25/30 viidi läbi eelkatsetused soovitud survetugevusega betooni saavutamiseks. Koostöös OÜ-ga TMB Element töötati välja eelkatsetuste jaoks C25/30 betooni retsept tabelis 2.2. Retsepti arvutamiseks kasutati OÜ TMB Element poolset betoonisegu arvutamise programmi. Tulemused esitatud tabelis 2.3.

Tabel 2.2. Betooni C25/35 retsept

Materjalid	Kogused g	Tegelik kogus g
Ropka liiv 0/8	10,19	10,19
Kaltsiit killustik 4/12	9,85	9,85
Tsement CEM I 52,5R	2,6	2,22
Vesi	1,58	1,58
Plastifikaator D190 (33)	0,026	0,026

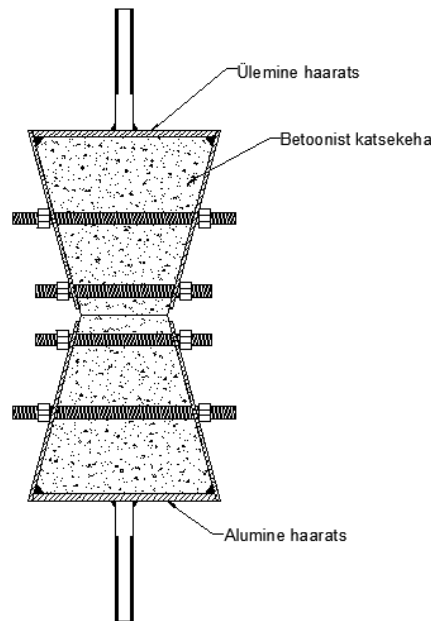
Tabel 2.3. Betooni C25/35 eelkatsetuse tulemused

Betoon	C25/30
Tsement	CEM I 52,5R Ultra
Lisand 1	D190(33)
Doseering %	1
Kogus m ³	0,01
Vesitsementtegur	0,8
Temperatuur °C	22,5
Töödeldavus mm	160
Kuubikute temperatuur 20h °C*	29,2
Tihedus 20h kg/m ³ *	2271
Tugevus 20h MPa*	12
Tihedus 4d kg/m ³	2296
Tugevus 4d MPa	24,3
Tihedus 7d kg/m ³	2287
Tugevus 7d MPa	28
Tihedus 11d kg/m ³	2300
Tugevus 11d MPa	30,6
Tihedus 28d kg/m ³	2293
Tugevus 28d MPa	32,1

Kahjuks ei ole kehtivat standardit üksiku teraskiu väljatõmbekatsete sooritamiseks. Seega katsemetoodika valikul võeti aluseks varem tehtud uurimistööd ühe teraskiu väljatõmbe katsetamistest.

2.1.1. Tõmbekatse metoodika

Teraskiu tõmbekatse läbiviimiseks pole Eestis kehtivat standardit. Katsed viiakse läbi seadmega Instron 3369, mis on mõeldud nii painde-, tõmbe- kui ka survekatseid teostama. Katsekehad tuleb asetada metallist haaratsite vahele ning haaratsid lukustuda keermelattide ja mutrite abil (joonis 2.2.).



Joonis 2.2. Fikseeritud katsekeha haaratsite vahel.

Sellisel viisil välditakse katsekehade väljatulekut haaratsite vahelt ning haaratsite deformeerumist. Masin rakendab ühtlase kiirusega koormust katsekehade tõmbamisel kuni betoonist katsekehadest teraskiud väljatõmbamiseni või purunemiseni. Seejärel registreeritakse jõud, mille juures teraskiud deformeerus või purunes. Koormamist alustatakse eelkoormuse rakendamisega, et elimineerida kõrvalisi siirdeid katse alguses. Katsemasinat juhitakse arvutitarkvara abil. Tulemusena esitatakse tõmbediagramm ehk siirde sõltuvus koormusest.

2.1.2. Survekatse metoodika

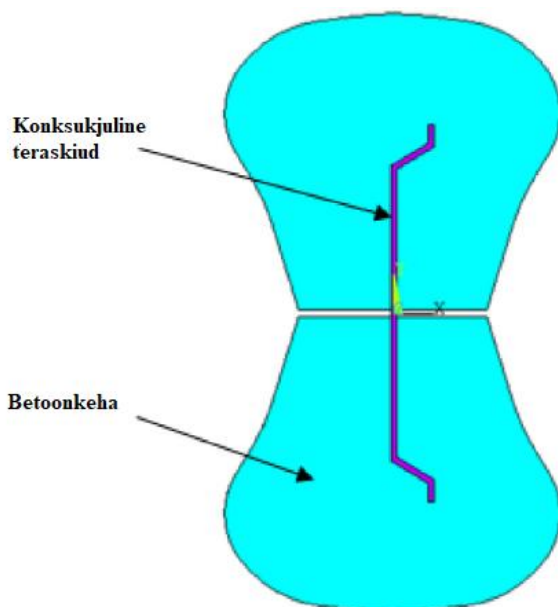
Teraskiudude nakketugevuste uurimisel tuleb kontrollida ka kasutatavate betooniklasside vastavust tegelikule survetugevusele. Survekatsete metoodikal võeti aluseks Eestis kehtivad standardid [28,29,30,31].

Survekatse läbiviimiseks on vaja silindrikujulisi või kuubikukujulisi katsekehasid vastavalt standardis EVS-EN 12390-1:2012 [29] toodud mõõtudega. Katse käigus koormatakse katsekehasid ühtlase kiirusega $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Koormus jaotatakse plaatide abil ühtlaselt kogu katsekeha pinnale. Peale algkoormuse rakendamist, mis ei ületa 30% katsekeha purustavast koormusest, suurendatakse ühtlase kiirusega koormust 10% kuni purunemiseni [28]. Tulemused registreeritakse ja arvutatakse välja katsekeha survetugevus. [28]

2.2. Seadmed ja vahendid

2.2.1. Proovikeha haaratsi projekteerimine ja valmistamine.

Tõmbekatse haaratsite projekteerimisel ja valmistamisel lähtuti peamiselt katsekehade geometriast. Aluseks võeti varem tehtud teraskiu väljatõmbekatsed [32]. Vaadates joonist 2.3 on näha, et katsekeha kuju on sarnane liivakellaga.



Joonis 2.3. Magistritöö aluseks võetud katsekehade kuju [32].

Koostöös metallitööde ettevõttega OÜ Tahel Metall leiti, et kumera kujuga haaratsi valmistamine on liiga töömahukas ning samuti osutub hiljem keeruliseks katsekehadele vormi ehitamine. Seega projekteeriti haaratsid küll liivakella kujulised kuid külgedelt tahulised (joonis 2.2.). Tahuline kuju lihtsustab hiljem katsekehade vormide projekteerimist ning nende valmistamist. Haaratsi projekteerimisel lähtuti eeldusest, et haaratseid oleks ka hiljem kasutavad ning leiaksid rakendust edaspidistel uurimistöödel. Näiteks on võimalik haaratsitega teostada katseid, kasutades korraga mitut kiudu.. Varasemalt tehtud väljatõmbekatsete tulemustes oli saadud maksimaalseks väljatõmbejõuks 50 N [32]. Kontrollimaks haaratsite keevisliidete tugevust teostati keevisõmblustele tugevusarvutused lihtsustatud meetodiga [33]:

$$F_{vw,Rd} = l_w a f_{vw,Rd} \quad (2.1)$$

kus $F_{vw,Rd}$ - nurkõmbeluse arvutuslik kandevõime N,

l_w - nurkõmbeluse tööpikkus mm,

a - õmbeluse kõrgus mm,

$f_{vw,Rd}$ - arvutuslik lõiketugevus N/mm².

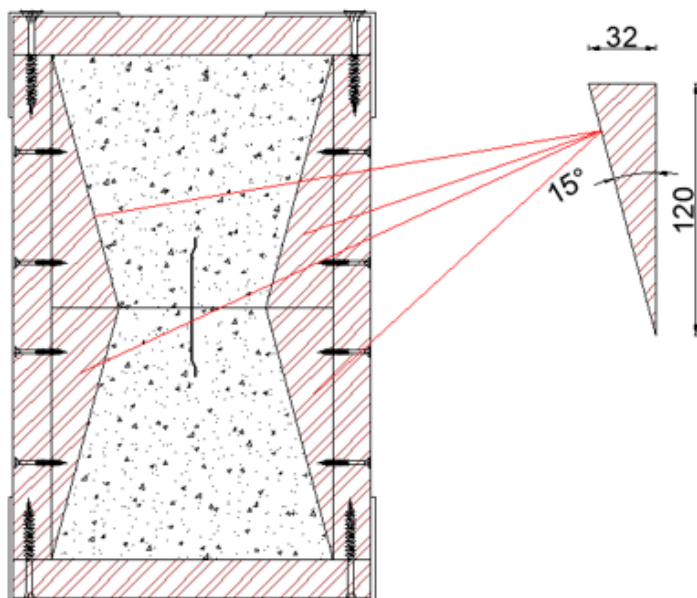
Antud valemi 2.1 arvutuste järgi saadi projekteeritud haaratsite pealmise plaadi ja kinnitusvarda vahelise keevisõmbeluse tugevuseks 13,54 kN. Pealmise ja külgmiste keevisõmbeluste tugevusteks saadi 25,49 kN. Teostatud arvutused näitasid, et keeviste tugevus on tagatud võrreldes katseseadme maksimaalse arendatava koormusega mitmekordselt.

Enne haaratsite valmistamist teostati kontrollmõõdistus katseseadme Instron 3369 masina haaratsitelt. Vastavalt mõõtmistele projekteeriti kaks terasest haaratsit (lisa 2).

Haaratseid valmistati metallitööde ettevõttes OÜ Tahel Metall. Haaratsi pealmine plaat koosneb kuue millimeetrisest terasplaadist. Küljed valmistati kolme millimeetrisest terasplaadist, mis asetati kuule millimeetriselise terasplaadi suhtes 15 kraadise nurga alla. Külgmistele plaatidele puuriti avad läbimõõduga 12 millimeetrit keermelati jaoks vältimaks katsetamise ajal külglaatide deformatsiooni ning katsekeha liikumist. Haaratsite pealmine ristkülikukujulise posti pikkus ja ristlõige valiti lähtuvalt katseseadme Instroni 3369 masina haaratsitest. Haaratsitele teostati enne vormide valmistamist kontrollmõõdistus, tagamaks õige haare katsemasina haaratsite vahel.

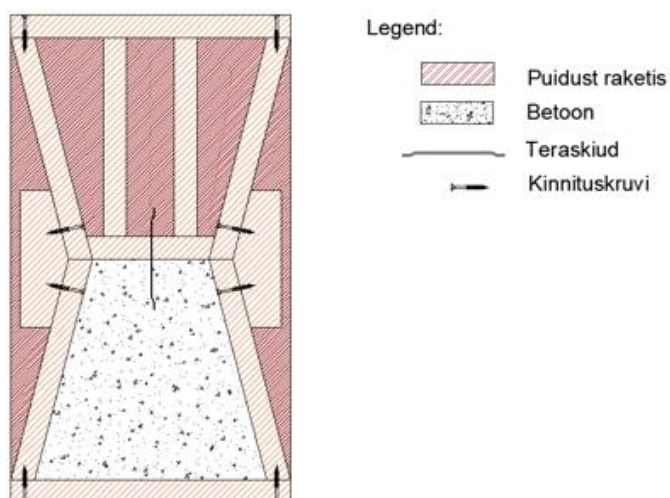
2.2.2. Väljatõmbe katsekehade vormide projekteerimine ja valmistamine

Katsekehade vormide projekteerimisel tutvuti võimalustega vormi külgede nurga alla projekteerimiseks. Algselt projekteeriti betoonkehale kalde andmiseks nurga all kiilud, mille üks ots oleks pidanud tulema terava tipuga (joonis 2.4.).



Joonis 2.4. Esialgselt projekteeritud pealt vaates katsekehade vorm.

Vormide valmistamisel osutus null tolerantsiga teravatipuliste kiilude valmistamine peaaegu võimatuks. Koostöös puidutisleriga jõuti tulemusele, et kiilud tuleb asendada külgedega, mille otsad freesitakse kalde alla. Külgede taha projekteeriti kahe kaldega post, toestamaks kalde all olevaid vormi külgesid (joonis 2.5). Veendumaks, et vorm peab vastu ka vibratsioonile, ehitati proovivorm ning valati esimene proovikeha. Vorm ehitati vastavalt joonisele (lisa 3).

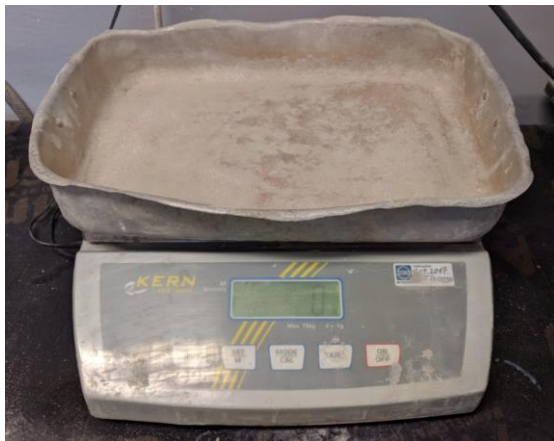


Joonis 2.5. Katsekehade valamiseks projekteeritud vorm.

Katsekeha valamisel ning hiljem ka lahti rakestamisel ei täheldatud vormil probleeme. Betoonkehale tehti teostusmöödistus, mille tulemusena kontrolliti katsekeha sobivust projekteeritud haaratsite vahel. Katsekehade valmistamise kiiruse huvides valmistati kokku 20 vormi.

2.2.3. Betoonkehade valmistamine

Betoonsegu valmistamiseks vajatakse esmalt kaalu (joonis 2.6.), millega kaaluda kogu vajaminev materjal. Kaaluga (joonis 2.6.) saab teostada mõõtmisi kuni 15 kg seejuures mõõtmistäpsusega 1g.



Joonis 2.6. Kaal Kern FKB15K1A.

Betoonsegu valmistamiseks kasutati elektrilist segumasinat (joonis 2.7.). Segumasin on pealt laetav, mis tähendab, et kogu materjal kallatakse silindrikujulisse mahutisse. Mahuti sees on kolm üksteisest eri kaugustel paiknevat laba, mis masina tööle lülitades segavad ühtlaselt materjale. Mahuti alumisel küljel paikneb luuk, mida on võimalik avada spetsiaalse hoova abil. Segumasinaga saab korraga segada 25 liitrit betooni.



Joonis 2.7. Betooni segumasin Matest C165.

Betoonsegu vajab tihendamist peale vormidesse valamist. Selleks on mitmeid meetodeid. Suuremate betoneerimiste korral kasutatakse vibronuia, millega vibreeritakse suuremad õhu tühimikud betoonsegu seest välja. Erandolukordades kasutatakse ka vormivibraatorit, mis kinnitatakse vormi külge. Magistritöös kasutati betoonsegu vibreerimiseks vibrolauda (joonis 2.8.).



Joonis 2.8. Vibrolaud Matest C183.

2.2.4. Survekatseseade

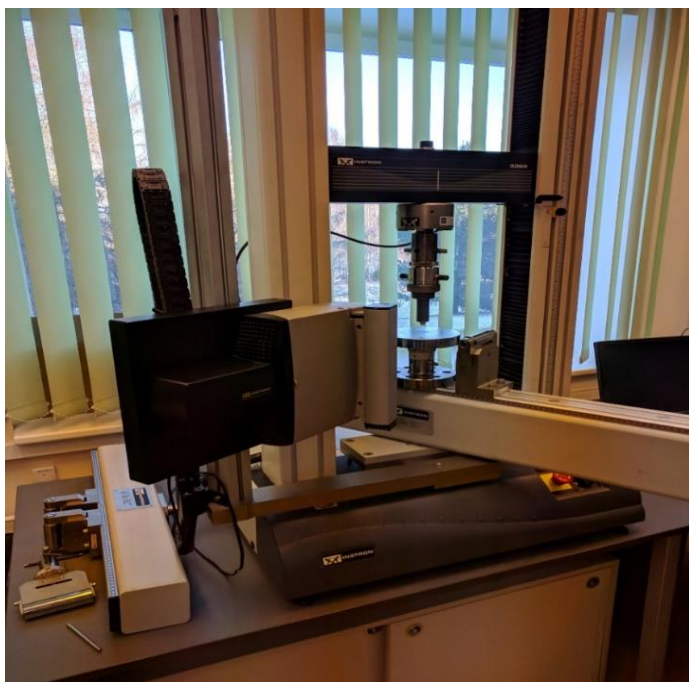
Magistritöös kasutati survetugevuse määramiseks survekatsemasinat Automax 5 (joonis 2.9.). Seadmel on kaks horisontaalset silindrikujulist metallplaati, mille vahele asetatakse katsekeha. Koormamisel surutakse plaadid kokku ning ühtlasi ka plaatide vahel asuvat materjali. Koormamist alustatakse materjali täismassist 10 % ulatuses ning seadme suurim arendatav jõud on kuni 100 kN. Kasutaja ohutuse tagamiseks on seadmel turvaklaas, vältimaks koormamise ajal materjalist võimalike tükide välja lendamist. Seade on ühenduses spetsiaalse tarkvaraga, mis registreerib koormisel rakendatavat jõudu ja siirdeid. Survekatse masin vastab standardile EN 12390-4 [34].



Joonis 2.9. Survekatsemasin Automax 5.

2.2.5. Tõmbekatseseade

Tõmbekatse seadme valikul sai määravaks seadme asukoht ning seadme hõivatavus peale katsekehade valmimist. Tõmbekatse seadmeks valiti Eesti Maaülikooli laboris paiknev seade Instron 3369 (joonis 2.10.). Seade leiab laialdast kasutust materjalide omaduste (tõmbe, painde, nihke, kõvaduse jne) uurimisel. Seadme maksimaalne koormus on 50 kN [35]. Seadet juhitakse arvutist tarkvara „Bluehill“ abil. Tarkvara väljastab tulemusi graafikute ja tabelite kujul.



Joonis 2.10. Universaalne katsemasin Instron 3369.

2.3. Katsekehade valmistamine

2.3.1. Survekatsekehade valmistamine

Vastavalt magistritöö eesmärgile valati betoonist survekatsekehad survetugevuse kontrollimaks tugevusklassidele C25/30 ning C35/45. Katsekehade valmistamisel kasutati OÜ TMB Element betooni retsepti arvutusprogrammi, mille tulemusena saadi teada betoonisegu jaoks vajaminevad kogused. Varasemalt oli teostatud killustikule ning liivale sõelanalüüsid. Vastavalt betooni retseptile (tabel 2.4), kaaluti kogu vajaminev materjal 10 liitristesse anumatesse.

Tabel 2.4. Betooni retseptid

Materjalid	Retsept C25/30	Retsept C35/45
	Kogused, kg	Kogused, kg
Ropka liiv 0/8	26,745	21,573
Kaltsiit killustik 4/12	24,622	28,657
Tsement CEM I 52,5R Ultra	6,5	9,45
Vesi	4	5,9
Plastifikaator D190 (33)	0,065	0,142

Betoonisegu segamiseks kasutati segumasinat. Masin õlitati hilisema puhastamise lihtsustamiseks vormiõliga üle. Seejärel asetati materjalid masinasse järjestusega liiv, killustik, tsement, vesi ning plastifikaator. Iga materjali lisamisega jälgiti segamise vahet 120 sekundit. Vee lisamisel jälgiti segu visuaalset konsistentsi ning vastavalt visuaalsele olukorrale korregeeriti vee koguseid. Samuti kontrolliti betoonisegu segamisel vastavalt standardile betoonisegu konsistentsi EVS-EN 12350-2:2009 [36]. Konsistentsi määramiseks asetati valmis segatud betoon veekindlast vineerist horisontaalsele alusele, mida ümbritses koonusekujuline lehter (joonis 2.11.).



Joonis 2.11. Koonus betoonisegu töödeldavuse hindamiseks.

Betoon asetati lehtrisse. Seejärel eemaldati betooni ümbert lehter ning asetati koonuse kujuline lehter betooni kõrvale vineerist aluse peale. Lehtri ülemisest otsast mõõdeti betooni koonuse kuju kõrgust (joonis 2.12.). Elektroonilise termomeetriga mõõdeti betoonisegu temperatuuri.



Joonis 2.12. Betoonisegu koonuse mõõtmine.

Betooni valamiseks kasutati spetsiaalselt vaakumvorme mõõtudega $100 \times 100 \times 100$ mm. Vormid õlitati vahetult enne betoonsegu segamist vormiõliga, vältimaks betooni nakkumist vormide külge. Peale betoonsegu valamist vormidesse asetati betoonist õhumullide kätte saamiseks ning tihendamiseks vormid vibrolauale (joonis 2.13.).



Joonis 2.13. Betooni tihendamine vibrolaual.

Seejärel siluti vormidesse valatud betoonsegu pealmine pind ning asetati vormid termokambrisse kivistuma. Termokambris tagati betoonsegu ümbritsevale keskkonnale ühtlane temperatuur. Kasutatud seadmed ning anumad puhastati voolava veega. Ööpäeva möödudes võeti vormidest suruõhu abil katsekehad välja ning asetati seejärel tagasi termokambrisse edasi kivistuma.

2.4. Tõmbekatsekehade valmistamine

Tõmbekatsekehade valmistamisel arvutati OÜ TMB Element arvutusprogrammiga välja täpne retsept, mis sisaldas vajaminevate materjalide koguseid ühe betoonivalu jaoks. Ühe valu tarbeks ehitati 20 vormi. Vormide arvu määramisel võeti aluseks segumasina mahutavus. Kahjuks pole tehnoloogiliselt võimalik betoneerida teraskiudu kahe betoonkeha vahele nii, et betooni pinnad teraskiu tsentris ei oleks omavahel ühendatud. Samuti peab teraskiud olema fikseeritud kahe betoonkeha vahelisest pinnast 90 kraadise nurga alla (lisa 4), omamata ühegi teise materjaliga lisa kinnitust. Seega betoneeriti tõmbekatsekeha kahes osas. Katsekehade valmistamisel kaaluti retseptide järgi vajaminevate materjalide kogused ning asetati anumatesse. Segamisel kasutati segumasinat, mis õlitati vahetult enne masina kasutamist vormiõliga, lihtsustamaks hilisemat masina puhastamist. Materjalid segati järjestusega, liiv, killustik, tsement, vesi ja plastifikaator. Vee lisamisel jälgiti visuaalselt betooni konsistentsi ning korrigeeriti vastavalt koguseid. Tõmbekatsekehade esimene vormi pool õlitati vormiõliga, vältimaks nakkumist betooni ja laminaat vineerist vormi vahel. Vormid õlitati enne teraskiu paigaldamist vältimaks vormiõli kokkupuudet teraskiuga (joonis 2.14.)



Joonis 2.14. Vormiõliga õlitatud katsekehade vormid.

Valmistatud betoonisegu valati vormidesse ning betoonisegu tihendamiseks ja poorsuse vähendamiseks kasutati vibrolauda. Vormid asetati töölaule ning korrigeeriti vastavalt vajadusel betoonisegu koguseid vormides. Seejärel anti vormides olevale betoonsegule kellu abiga terashõõrde pind. Katsekehad asetati kivistuma (joonis 2.15.)



Joonis 2.15. Kivistuma asetatud katsekehad.

Õöpäeva möödudes eemaldati vormidelt keskmine osa. Teraskiu betoneeritav osa kaeti vormi õlitamise ajaks kinni vältimaks vormiõli kokkupuudet teraskiuga. Peale vormide teise poole õlitamist asetati olemasoleva betoonkeha vastu kile, eraldamaks kahte betoonkeha teineteisest. Olemasolev betoonkehale markeeriti musta markeriga betoonivalu kuupäev, betoonimark ning kasutatud teraskiud ja kiu asetus. Seejärel kaaluti katsekeha teise poole betoonisegu jaoks vajaminev materjali kogus ning asetati segumasinasse. Peale segamist valati betoonsegu juba eelnevalt õlitatud vormidesse. Seejärel tõsteti vormid vibrolaua peale tihendamiseks. Pärast vormide vibreerimist asetati vormid lauale ning betoonisegule tehti kellu abiga terashõõrde pinnaviimistlus (joonis 2.16.).



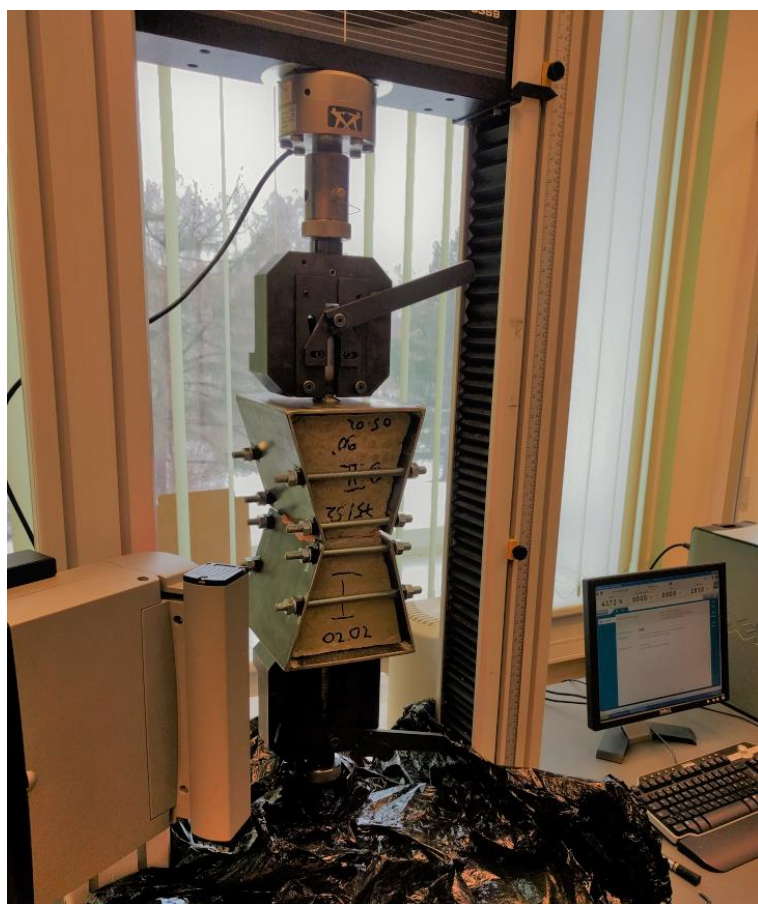
Joonis 2.16. Kivistuvad katsekehad.

Õöpäeva möödudes eemaldati vormidest betoonist katsekehad. Katsekeha eemaldamiseks vormist demonteeriti vormi üks külg kruvidest lahti ning tõsteti katsekeha ettevaatlikult tasasele alusele järel kivistuma ja saavutama 28 päevast survetugevust. Vormid puhastati ning monteeriti taas kokku. Katsekehade valmistamisel kasutati ühte vormi neli korda, mille tulemusena valmis 80 katsekeha. Peale viimaste katsekehade valmimist transporditi katsekehad Eesti Maaülikooli õppeklassi väljatõmbekatsete sooritamiseks. Transportimisel tõsteti iga katsekeha hoolikalt eraldi kõvale alusele vältimaks teraskiu deformeerumist.

2.5. Katsete käik

Betoonkehade survekatsed teostati OÜ TMB Element laboris vastavalt standardile EVS-EN 12390-2:2009 [32]. Survekatsed viidi läbi enne tõmbekatsekehade valamist, tõestamaks betoonkehade soovitud survetugevust. Survekatseid teostati OÜ TMB Element inseneri poolt ning tulemused edastati töö autorile.

Tõmbekatse viidi läbi Eesti Maaülikooli laboris. Katsete läbiviimiseks oli valmistatud kokku 80 katsekeha kahe erineva teraskiuga ja kahe erineva betooniga. Katsete läbiviimist alustati tõmbemaasina Instron 3369 seadistamisega (joonis 2.17). Katsemasinale monteeriti külge tõmbehaarsid. Seejärel asetati masina haaratsite vahele projekteeritud katsekehade



Joonis 2.17. Katsekeha asetus masina haaratsite vahel.

haaratsid. Masina ümbrus kaeti kilega kinni, vältimaks betooni puru sattumist masina elektroonikale ning liikuvate osade vahele. Masin on ühendatud arvutiga ning vastava programmi abil seadistati masinale koormamiskiirus ja jõud. Katsekehade asetamiseks masina haaratsite vahele pidi haaratsid viima asendisse, kus kahe haaratsi vahele jääb 10 mm vahe. Haaratsite asend fikseeriti, et peale igat katsekeha katsetamist taastuks haaratsite algne asend järgmise katsekeha paigaldamiseks.

Haaratsitelt demonteeriti ühelt poolt keermelatid ning katsekeha asetati haaratsite vahele. Seejärel paigaldati keermelatid tagasi ning keerati mutritega kinni vältimaks katsetamise ajal haaratsite paindumist ning katsekehade liikumist. Katsemasina Instron 3369 tarkvara väljastab tõmbediagrammi. Siirdeid mõõdeti videoekstessomeetriga, mis asetati katsekeha ette ning katsekehale märgiti musta markeri abil kaks punkti. Seejärel fikseeriti programmis

punktide vahe ning sisestati katsekeha number. Katsekeha koormamise kiirus valiti vastavalt survekatse koormamise kiirusele. Katsekeha koormati kuni teraskiu purunemiseni või betoonist välja tulemiseni. Peale katsekeha katsetamist demonteeriti haaratsite ühelt küljelt lahti keermelatid ning võeti katsekeha betooni tükid haaratsite vahelt välja. Teraskiudude purunemisviisid pildistati ülesse. Esimese katsekeha katsetamise kestus ajaliselt oli ajamahukas, seega otsustati, et järgmiste katsekehade katsetamisel seatakse algkoormus 50 N ning tõsteti koormamiskiirust 100 N/min lähtuvalt esimese katsekeha katsetulemustest.

3. UURIMISTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Survekatse tulemused

Survekatsete tulemuste eesmärgiks oli selgitada tõmbekatsekehades kasutatava betooni vastavust magistritöö eesmärgis püstitatud katsekehade survetugevustele. Katsekehasid valmistati kokku 20. Survekatsete teostati proovikehadele vanuses 20 tundi ja 4, 7, 11 ning 28 päeva. Katsete tulemused koos betoonisegu töödeldavuse ja vesitsementteguritega on esitatud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Betooni survekatsete tulemused koos betoonisegu töödeldavuse ja vesitsementteguriga

Betoon	C25/30	C35/45
Vesitsementtegur	0,80	0,49
Temperatuur °C	22,5	22,1
Töödeldavus mm	160	230
Kuubikute temperatuur 20h °C*	29,2	30,8
Tugevus (20 h) MPa*	12,0	33,3
Tugevus (4 p) MPa	24,3	53,6
Tugevus (7 p) MPa	28,0	60,9
Tugevus (11 p) MPa	30,6	62,1
Tugevus (28 p) MPa	32,1	67,4

Märkus.* kuubikud termokastis

Tabel 3.1 kajastab lisaks madala tugevusklassiga betooni ja kõrgema tugevusklassiga betooni katsetulemustele ka katsekehade kivistumise tingimusi ning vesitsementtegurit. Tabelist 3.1 vaadates on näha, et madala tugevusklassiga betoon on saavutanud 20 tunni möödudes oma lõpp survetugevusest 37,4%. Betooni survetugevuse kasv on toimunud jõudsalt kuni seitsme päevani ning sealt edasi on betooni tugevuse kasv aeglustunud. Katsekehad on saavutanud 28 päeva vanuselt survetugevuse 32,1 MPa, mis tähendab, et antud retseptiga on saavutatud magistritöös soovitud betooni tugevuseklass C25/30. Kõrgema betooni tugevusklassiga retsepti puhul on peale 20 tunni kivistumist saavutanud betoon lõplikult survetugevusest 49,4%. Magistritöös vajalik survetugevus saavutati juba peale nelja päevast kivistumist. Olulist survetugevuse kasvu on kõrgema tugevusklassiga

betooni puhul näha kuni nelja päeva möödumiseni ning sealt edasi on survetugevuse kasv aeglustunud. Peale 11 päeva kuni 28 päeva möödumisest on survetugevuse kasv hoogustunud. Soovitud betooni tugevuseklass C35/45 puhul saavutati hoopiski betoon, mis vastab tugevusklassile C50/60. Madala betooni tugevusklassi puhul on betooni töödeldavus võrreldes kõrgema betooni klassiga väiksem 30,4% ning märkimist väärib asjaolu, et vesitsementtegur on madala klassiga betooni puhul 30% suurem. Väiksem töödeldavus ja kõrgem vesitsementtegur on põhjustatud betoonsegus olevast suuremast liiva ja vee kogusest. Kõrgema tugevusklassiga betooni puhul on tegemist suurema tsemendi ja killustiku kogusega ning väiksema vee kogusega, mis tagavad ka betoonile kõrgema survetugevuse.

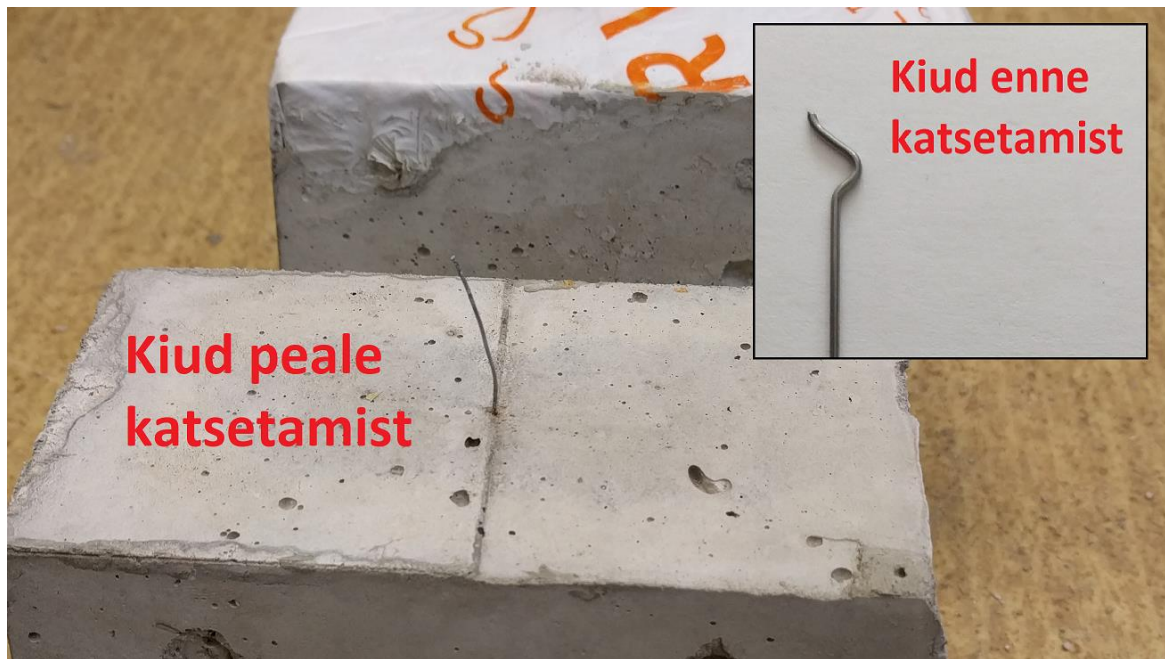
3.2. Teraskiu väljatõmbekatse tulemused

Magistritöös uuriti kahe erineva teraskiu XP 75/62 ja HE 75/52 nakketugevust betoonis. Katsed teostati kahes erineva survetugevusklassiga betoonis. Kiudusid katsetati betoonis 90 ning 70 kraadise nurga all mõõdetuna kahe betoonkeha kokkupuute pinnast (lisa 4). Kokku valmistati 80 katsekeha. Katsete tulemused kanti kahte tabelisse vastavalt teraskiudude markidele. Tabelites märgiti ära katsete tulemused, kiudude tehniline info, kiudude asend betoonis, betooni klassid ning mõõdetud siirded.

3.2.1. Kiu XP 75/62 väljatõmbekatse tulemused

Teraskiuga XP 75/62 teostati katsetusi kokku neli seeriat, millest igas seerias oli kokku kümme katsekeha. Katsed näitasid, et betooni tugevus mõjutab teraskiu nakketugevust (lisa 5). Madala klassiga betooni puhul on teraskiu väljatõmbejõud väiksem kui kõrgema klassiga betooni puhul. Põhjuseks on betooni koostises olevate materjalide kogused. Madala tugevusklassiga betooni puhul on killustiku ja liiva kogus suurem ning tsemendi kogus väiksem. Kõrgema tugevusklassiga betooni puhul aga vastupidi. Tabelist vaadates on näha, et tulemuste varieeruvus katsete seeriates oli suur. Siinkohal võib tulemusi mõjutada teraskiudu ümbritsev betooni koostis. Killustiku paiknemine teraskiuga otseses kokkupuutes halvendab teraskiu nakket. Lisa 5 toodud tabelit vaadates on näha, et C25/30 klassiga betoonis on teraskiu kõige väiksem väljatõmbejõud 130,37 N kiu asetsemisega 90 kraadise

nurga all. Kõige suurem väljatõmbejõud C25/30 betoonis oli 551,83 N ning kiud asetses betoonis 70 kraadise nurga all. Betoonis C35/45 oli aga madalaim väärtus 332,88 N ja kõrgeim tulemus 605,69 N, mõlemal juhul kiu asetusega 70 kraadi. Lisa 5 esitatud tabeli tulemuste põhjal saab järeldada, et madala survetugevusklassiga betooni puhul teraskiu väljatõmbetugevus sõltub oluliselt kiu asetusest. Kõrgema klassiga betooni puhul on muutus märgatavalt väiksem. Katsete käigus deformeerusid kiudude ankurdusotsad sirgeks (joonis 3.1.).



Joonis 3.1. Tõmbekatse tulemusena deformeerunud teraskiud.

Olulist märkimist väärib asjaolu, et kõrgema tugevusklassiga betoonis 70 kraadise nurga alla asetsenud kiududel väljatõmbetugevus oli suurem kiu tõmbetugevusest ja purunemine toimus betoonpinna vahetus läheduses.

3.2.2. Kiu HE75/52 väljatõmbekatse tulemused

Teraskiuga HE 75/52 teostati kokku neli katseseeriat ning igas seerias oli kokku kümme katsekeha. Katsetetulemused andsid ülevaate teraskiu väljatõmbetugevusest ning selle seostest betooni tugevusega (lisa 6). Tulemuste põhjal saab järeldada, et betooni tugevus mõjutab teraskiu nakketugevust. Lisas 6 esitatud tabeli andmete põhjal võib järeldada, et

vähemal määral mõjutab kiu asend betoonis väljatõmbetugevust. Samuti on näha, et tulemuste varieeruvus on liiga suur, kohati isegi kahekordne. Betoonimargi C25/30 puhul on kõige väiksem tulemus 105,61 N ning suurim tulemus 394,74 N. Mõlemad tulemused on saadud kiudude asetusega 90 kraadi. Betooni tugevusklassiga C35/45 puhul on väikseim tulemus 168,88 N ning suurim tulemus 443,64 N. Tõmbekatsete läbiviimisel kiud deformeerusid sirgeks ning kiudude purunemist ei esinenud.

3.3. XP 75/62 ja HE 75/52 kiudude väljatõmbejõu ning nakketugevuse võrdlus ja arutelu

Kahe kujult ja pikkuselt erineva kiu betoonist väljatõmbejõudude tulemuste erinevused olid kohati väga suured. Vaadates lisa 5 ja 6 esitatud tabelites teraskiude betooni tugevusklassis C25/30 asetusega 90 kraadi on näha, et erinevus on minimaalne. Kiu XP 75/62 aritmeetiline keskmine tulemus on $237,55 \pm 10$ N ning HE 75/52 aritmeetiline keskmine tulemus on $223,58 \pm 10$ N. Kahe kiu aritmeetiliste keskmiste vahe on $13,97 \pm 10$ N. Võrreldes samas betoonis C25/30 kiu asetusega 70 kraadi saadud tulemusi on näha, et tulemused on märgatavalt erinevad. Kiudude aritmeetiliste keskmiste erinevus on $240,10 \pm 10$ N. Kõrgema klassiga betoonis C35/45 tabelist võib näha, et kiud asetusega 90 kraadi erinevad kiudude aritmeetilised keskmised tulemused teineteisest $220,46 \pm 10$ N võrra. Suurt erinevust saab täheldada ka betoonis C35/45, kus kiudude keskmised tulemused erinevad $215,75 \pm 10$ N võrra. Tulemuste põhjal võib järeldada, et kiudude ankurduse kuju ja pikkus mõjutavad kiudude väljatõmbejõudu betoonist. Kõrgema tugevusklassiga betooni C35/45 puhul saab teha järelduse, et olenemata kiu asetusest betoonis tuleb kiu XP 75/62 välja tõmbamiseks rakendada umbes 40% rohkem jõudu kui kiu HE 75/52 välja tõmbamiseks. Töös tehtud katsete tulemuste põhjal on näha, et betoonis C25/30 kiudude ankurduse kuju ning pikkus ei mõjuta oluliselt kiudude väljatõmbejõudu kiu asetusega 90 kraadi. Küll aga mõjutab tulemusi madala tugevusklassiga betoonis C25/30 kiu asetus. Lisas 6 toodud tabelis võime näha, et kiu XP 75/62 asetusega 70 kraadi madala tugevusklassiga betoonis C25/30 tuleb rakendada umbes 35 % rohkem koormust kui kiu välja tõmbamisel 90 kraadise nurga alt. Teraskiudude nakketugevuse leidmiseks kasutati lihtsustavat silevarraste nakketugevuse valemit, mis võtab arvesse kasutatava betooni tugevusklassi [33]:

$$f_{bd} = 0,36 \eta_1 \eta_2 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \quad (3.1)$$

kus, f_{bd} – nakketugevus silevardal MPa,

η_1 – heade nakketingimuste korral $\eta_1=1$, halbade nakketingimuste korral $\eta_1=0,7$,

η_2 – $\varnothing \leq 32$ mm korral $\eta_2=1$,

f_{ck} – betooni normsurvetugevus MPa, mitte suurem kui klassil C50/60,

γ_c – tegur 1,5.

Arvutamise aluseks võeti head nakketingimused. Lihtsustatud arvutusvalem ei võta arvesse teraskiu ankurduskuju. Valemi 3.1 põhjal on nakketugevus C25/30 klassiga betoonis 1,3 MPa ning töös kasutatud tegeliku survetugevusklassiga C50/60 betoonis 1,7 MPa. Valemi 3.1 arvutuse tulemuste põhjal on näha, et kõrgema ja madalama betooni tugevusklassi nakketugevuste vahe 0,4 MPa.

3.4. Katsetulemuste korrelatsioon

Katsetulemuste ja lähteandmete kohta teostati mõlema teraskiu kohta korrelatsioonimaatriks uurimaks tulemuste ja lähteandmete omavahelisi seoseid. Korrelatsioonimaatriks teostati funktsiooniga (*Correlation*) arvutustarkvaraga MS Excel [37]. Tabeli tõlgendamisel lähtutakse absoluutväärtusest, mis iseloomustab seose tugevust kahe tunnuse vahel [38]. Eristatakse kolme seost: nõrka, keskmist ja tugevat [38]. Tulemused, mis jäävad vahemikku 0,5- 0,7 loetakse keskmiseks seoseks, alla 0,5 jääv absoluutväärtus on nõrk seos ning 0,7 üles poole jäävat tulemust loetakse tugevaks seoseks [38]. Teraskiu XP 75/62 korrelatsioonimaatriks on esitatud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Teraskiu XP 75/62 korrelatsioonimaatriks

	Betooni klass	Teraskiu asetus	Väljatõmbejõud	Siire
Betooni klass	1			
Teraskiu asetus	8,051E-18	1		
Väljatõmbejõud	0,4612388	-0,230610999	1	
Siire	0,0164148	-0,477673119	0,388184	1

Maatriks näitab, et seos betooni tugevuse ja teraskiu väljatõmbejõu vahel on olemas. Tulemus jääb küll 0,04 ühikut alla poole 0,5, mis tähendab, et tegemist on nõrga positiivse seosega. Veelgi nõrgem seos on aga teraskiu nurga ja väljatõmbejõu vahel, kus on tegemist negatiivse nõrga seosega. Tulemustest võib järeldada, et suurendades betooni tugevust mõjutab see teraskiu väljatõmetugevust. Vähesel määral mõjutab ka teraskiu asetus betoonis väljatõmbetugevust. Seevastu tugevam seos on teraskiu asetusel ja siiretel, kuid tabelist võime näha, et tulemus jääb alla 0,5, seega loetakse seost nõrgaks seoseks. Teraskiu HE 75/52 korelatsiooni maatriks on esitatud tabel 3.3.

Tabel 3.3. Teraskiu HE 75/52 korrelatsioonimaatriks

	Betooni klass	Teraskiu asetus	Väljatõmbejõud	Siire
Betooni klass	1			
Teraskiu asetus	8,051E-18	1		
Väljatõmbejõud	0,3571924	0,162605136	1	
Siire	0,1999225	-0,31770318	0,15448	1

Korrelatsioonimaatriksit vaadates on näha, et antud teraskiu puhul on betooni ja teraskiu väljatõmbejõu vahel positiivne nõrk seos. Teraskiu asetuse ning siirde vahel on nõrk negatiivne seos. Maatriksist on näha, et teraskiu asetus betoonis mõjutab vähesel määral teraskiu väljatõmbejõudu.

3.5. Regressioonianalüüs

Teraskiu väljatõmbejõu, betooni tugevuse, teraskiudude ja nende asetuse seoste uurimiseks koostati lineaarne regressioonianalüüs. Regressioonimudel koostati tabelarvutuse tarkvara MS Excel funktsiooniga (*Regressioon*) [37]. Mudeli tulemused on esitatud lisa 7 toodud tabelis. Mudelit analüüsid näeme, et *Multiple R* on 0,68 millest võib järeldada, et seos teraskiu väljatõmbejõu ning betooni tugevuse, kiu ja kiu asetuse vahel on keskmiselt suurem. R^2 tulemus näitab ära põhjusliku tunnuse 46% tagajärgse tunnuse muutumistest, mis tähendab, et võrrand iseloomustab sõltuvat muutujat keskpäraselt [38]. Regressioonianalüüsi *Significance F* on tunduvalt väiksem kui 0,05 millest võib järeldada, et väljatõmbejõu ning

betooni tugevuse, teraskiu ning teraskiu asetuse vahel on usaldatav lineaarne seos. Regressioonianalüüsi tulemusena koostati ka teraskiu väljatõmbejõu arvutamiseks valem:

$$y=661,681+2,542x_1-0,903x_2+16,082x_3, \quad (3.2)$$

kus y - teraskiu väljatõmbejõud N,

x_1 – betooni tugevus MPa,

x_2 - teraskiu asetuse betoonis °,

x_3 – teraskiu pikkus mm.

Valem (3.2) kehtib ainult katsetatud kiudude, betooni tugevuse ning kiudude asetuse korral.

KOKKUVÕTE

Magistriöös uuriti üksiku teraskiu väljatõmbetugevust. Töös kasutati kahte erinevat teraskiudu XP 75/62 ja HE 75/52, mis erinesid teineteisest kuju ja pikkuse poolest. Töö eesmärgiks oli kindlaks teha kas ja kui palju mõjutab teraskiudude ankurduse kuju ning betooni tugevus teraskiu ja betooni vahelist nakketugevust. Parema ülevaate saamiseks betooni mõjust nakketugevusele kasutati kahte erineva tugevusklassiga betooni C25/30 ja C35/45. Betooni tugevuse kontrollimiseks teostati töös kasutatavale betoonile survekatseid. Survekatse proovikehade valmistamisel ja katsetamisel lähtuti Eestis kehtivatest standarditest. Survekatsed näitasid, et madala tugevusklassiga betoon C25/30 vastas oma tugevusele, kuid betoon C35/45 osutus siiski kõrgema tugevusklassiga betooniks C50/60. Tõmbekatsekehade valmistamisel asetati teraskiud betoonist katsekeha sisse 90 kraadise ning 70 kraadise nurga alla kahe betoonkeha kokkupuute pinnast. Kiudude asetusega 90 ja 70 kraadi sooviti teada saada, kui palju mõjutab teraskiu asetus kiudude nakketugevust. Töös valmistati kokku 80 tõmbekatse proovikeha, mis koosnesid kahest betoonkehast, mille vahele oli paigaldatud kile ning kahte betoonkeha ühendas omavahel üks teraskiud. Proovikehade valmistamiseks projekteeriti ja ehitati spetsiaalsed vormid ning katsetamise tarbeks metallist haaratsid.

Magistritöö käigus uuriti kirjandust ning varem tehtud katseid ühe teraskiu betoonist väljatõmbamise kohta. Kahjuks ei leitud uurimistöö käigus standardit või juhendit ühe teraskiu väljatõmbekatsete kohta. Seega juhenduti katsete läbiviimisel varem tehtud uurimistöödest ja juhendaja soovitustest. Katsetulemused näitasid, et teraskiu väljatõmbetugevus sõltub oluliselt kiu ankurduskujust ning betooni tugevusest. Samuti mõjutab ka kiu asetus tulemust. Suurim väljatõmbejõud saavutati XP75/62 kiuga 605 N, kiu asetusega 70 kraadi. Teraskiu HE 75/52 puhul oli suurim väljatõmbejõud betoonist 443 N kiu asetusega 90 kraadi. Mõlemate kiudude kõrgemad tulemused saadi betooniga C35/45. Teraskiudude väljatõmbekatsete käigus deformeerusid kiudude ankurduskujud sirgeks. Katsetamise käigus esines ka kiudude purunemist, mis leidsid aset suurema tugevusklassiga betoonis 70 kraadi kaldu asetsevate kiudude puhul. Katsetulemuste varieeruvus ühe seeria lõikes oli suur ning seega tuleks teostada täiendavaid katseid ühe teraskiu väljatõmbamise kohta.

Antud magistritöö raames kerkis esile ka mitmeid ideid ja ettepanekuid edaspidiseks teraskiu ja betooni vahelise nakketugevuse uurimiseks. Katsekehade valmistamiseks tuleks edaspidi

arendada välja tehnoloogia, mis võimaldaks valada korraga kaks betoonkeha, mida ühendab ainult üks teraskiud. Selline tehnoloogia lihtsustaks katsekehade valmistamist ning elimineeriks võimaluse, et ühel betoonkehal on suurem survetugevus kui teisel. Teiseks peaks suurendama töös kasutatavate betoonsegude tugevusklasside hulka, et selgitada kui palju mõjutab erinevate betoonide tugevus nakketugevust. Samuti tuleks lähemalt uurida teraskiudude ankurduskuju mõju nakketugevusele ning seeläbi töötama välja arvutusvalemid, mis võtaksid arvesse nii teraskiudude ankurduskuju, betooni tugevusklassi kui ka kiudude asetust betoonis. Ühe teraskiu väljatõmbekatseid peaks edasi arendama ning looma seeläbi ka seoseid teraskiudude doseerimiskoguste ning betooni tugevusklasside vahel.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Tillemann, H.** (1966). Inimene loob kivi. Tallinn:Valgus. 11 lk.
2. Eesti Betooniühing. (s.a). Betoon Maailmas. [veebileht] 0 (11.03.2018).
3. Planet world. (s.a). Pantheon. [veebileht] <http://www.planetware.com/rome/pantheon-i-larp.htm> (10.04.2018).
4. **Kangur, P., Trumm, U.** (2014). Eesti betoonehituse ajalugu. Tallinn: In Nomine. 17, 19 lk.
5. Eesti Betooniühing.(s.a). Betoon Eestis. [veebileht] <http://www.beton.org/beton-eestis/> (11.03.2018).
6. **Kadri Masing.** (2013). Aasta betoonehitis on Lennusadam vesilennukite angaar. - Postimees [e-ajakiri] <https://www.err.ee/344176/aasta-betoonehitis-on-lennusadama-vesilennukite-angaar> (10.04.2018).
7. Ruudus ja Betotrade. (s.a). Ajalugu. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/ajalugu.htm> (15.03.2018).
8. Encyclopaedia Britannica.(s.a). Concrete building material. [veebileht] <https://www.britannica.com/technology/reinforced-concrete> (15.03.2018).
9. **Valgur, J.** (2014). Raudbetoonkonstruktsioonid I. Loengumaterjal: Eesti Maaülikool, Tartu.
10. **Soidra, R.** (1984). Betoon. Tartu: 5 lk.
11. **Matve, H., Veigel, P.** (1964). Raudbetooni tootmine Tallinn:Eesti riiklik kirjastus. 35 lk.
12. **Kiviste, M., Pallav, V.** (s.a). Betoon. Loengumaterjal: Eesti Maaülikool, Tartu
13. **Otsmaa, V.** (2000). Betooni klass, selle mõiste ja määramine.- Ehitaja 9/51 [e-ajakiri] http://www.beton.org/wp-content/themes/beton/pdf/EH00_9.pdf (19.02.2018).
14. Valukivi. (s.a). KKK-Hinnad. [veebileht] <http://www.valukivi.ee/kkk/> (20.03.2018).
15. **Uustalu, E.** (2000). Talvine betoneerimine.- *Ehitaja*. Nr 11, lk 20.
16. Glen. (s.a). Lambot concrete boat. [veebileht] <http://boatbuilders.glen-l.com/36887/boats-made-of-concrete/> (19.03.2018)
17. **M.,Laurson, V.,Pallav.** (s.a). Kiudmaterjalid. Loengumaterjal: Eesti Maaülikool
18. Ruudus ja Betotrade. (s.a). Kiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/kiud.htm> (17.02.2018).
19. Semtu. (s.a).Klaaskiud.[veebileht] <https://www.semtu.ee/ee/tooted/kiud/klaaskiud/> (18.02.2018).

20. Ruudus ja Betotrade. (s.a). Klaaskiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/klaaskiud.htm> (23.02.2018).
21. Carbon. (s.a) KKK. [veebileht] <http://www.carbon.ee/et/p/kkk> (09.04.2018).
22. Ruudus ja Betotrade. (s.a). Polüpropüleenkiud. [veebileht] <http://www.kiudbetoon.ee/polukiud.htm> (05.03.2018)
23. Udras, S, M. (2016). Teraskiudude kuju ja omaduste mõju kiudbetoonelementide paindetugevusele. Magistritöö: Eesti Maaülikool, Tartu.
24. **Brauns, J.** (2013). Investigation and prognosis of steel fibre concrete deformation properties. Jelgava. 41-42 lk
25. Khabaz, A. (2016). Monitoring of impact of hooked ends on mechanical behavior of steel fiber in concrete. Riyadh:
26. Severstal (s.a) Hendrix Prime 75/62-hooked ends fiiber. [veebileht] <http://www.severstalmetiz.com/eng/catalogue/1930/document6621o.shtml?1930,2> (15.04.2018).
27. Betotrade. (2010). EC-certificate of conformity [veebileht] <http://betotrade.ee/uus/et/toeostusporand-est/betooni-pinnakovendid/olemasolevale-pinnale-est/8-est/sertifikaadid/43-ce-certification-hendix-prime-75-52-en> (15.04.2018).
28. Kivistunud betooni katsetamine. (2009). Katsekehade survetugevus: Eesti standard EVS-EN 12390-3:2009. Tallinn: Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12390-3-2009> (14.04.2017).
29. Kivistunud betooni katsetamine (2012) Kuju ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded: Eesti standard EVS-EN 12390-1:2012 Tallinn: Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12390-1-2012> (14.04.2018).
30. Kivistunud betooni katsetamine. (2009) Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine: Eesti standard EVS-EN 12390-2:2009. Tallinn: Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12390-2-2009> (13.04.2018).
31. Kivistunud betooni katsetamine. (2002) Survetugevus katsemasinadele esitatavad nõuded: Eesti standard EVS-EN 12390-4:2002 Tallinn: Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12390-4-2002> (12.04.2018).
32. Amjad Khabez. (2016) Monitoring of impact of hooked ends on mechanical behavior of steel fiber in concrete. [veebileht] <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-f1fba7c1-9f66-358a-b897-0577ac03ae06/tab/summary> (20.03.2018).
33. **Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipmna, T., Pukk, O., Õiger, K., Just, K., Just, A., Hartšuk, V.** (2014). Ehituskonstruktori käsiraamat. Tallinn: Ehitame. 449,280 lk.

34. Qualitest. (s.a) Automax 5 [veebileht]
http://www.worldoftest.com/sites/default/files/pdf/Qualitest_automax5.pdf (14.04.2018).
35. Instron (s.a) Instron tensile [veebileht] <http://www.instron.co.uk/-/media/literature-library/manuals/3360-dual-column-table-frames-operator-guide.pdf> (13.04.2018).
36. Betoonisegu katsetamine. (2009) Vajumiskatse: Eesti standard EVS-EN 12350-2:2009
Tallinn: Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-12350-2-2009>
(12.04.2018).
37. Tartu Ülikool. (s.a). Korrelatsioonikordajad. [veebileht]
<http://samm.ut.ee/korrelatsioonikordajad> (15.04.2018).
38. **Ruus, R.** (2015). Tõenäosusteooria ja statistika. Loengumaterjal: Eesti Maaülikool. Tartu.

Lisa 1. Katse tulemused

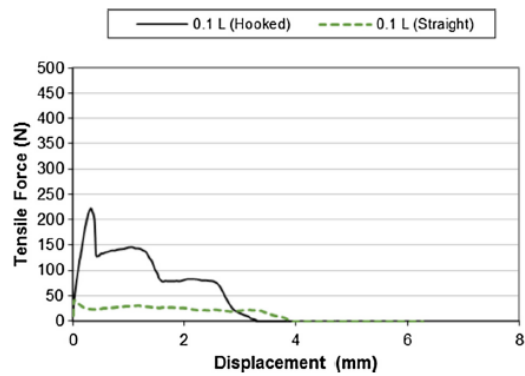


Fig. 3.1. Bond strength development when using hooked ends in case of embedded length = 0.1 L.

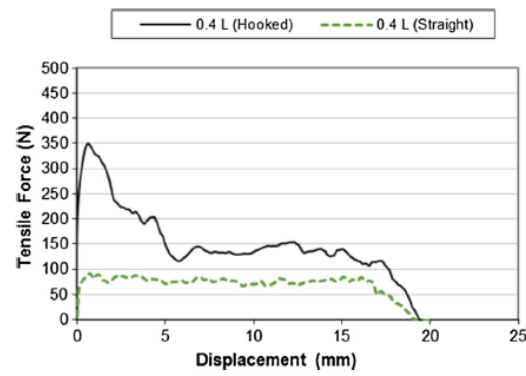


Fig. 3.4. Bond strength development when using hooked ends in case of embedded length = 0.4 L.

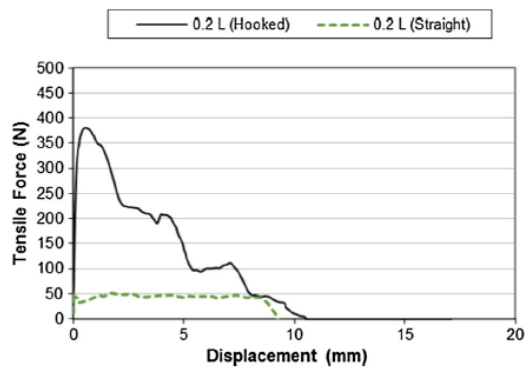


Fig. 3.2. Bond strength development when using hooked ends in case of embedded length = 0.2 L.

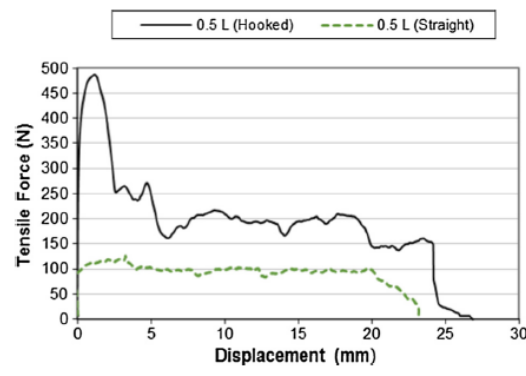


Fig. 3.5. Bond strength development when using hooked ends in case of embedded length = 0.5 L.

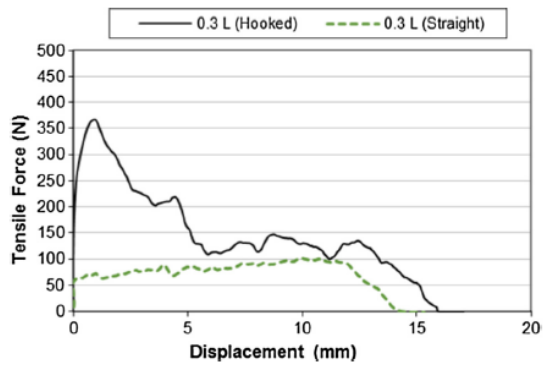
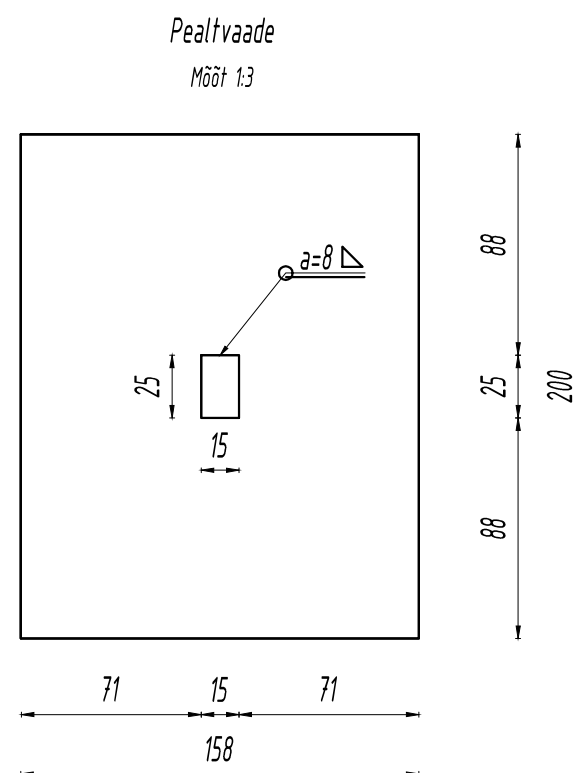
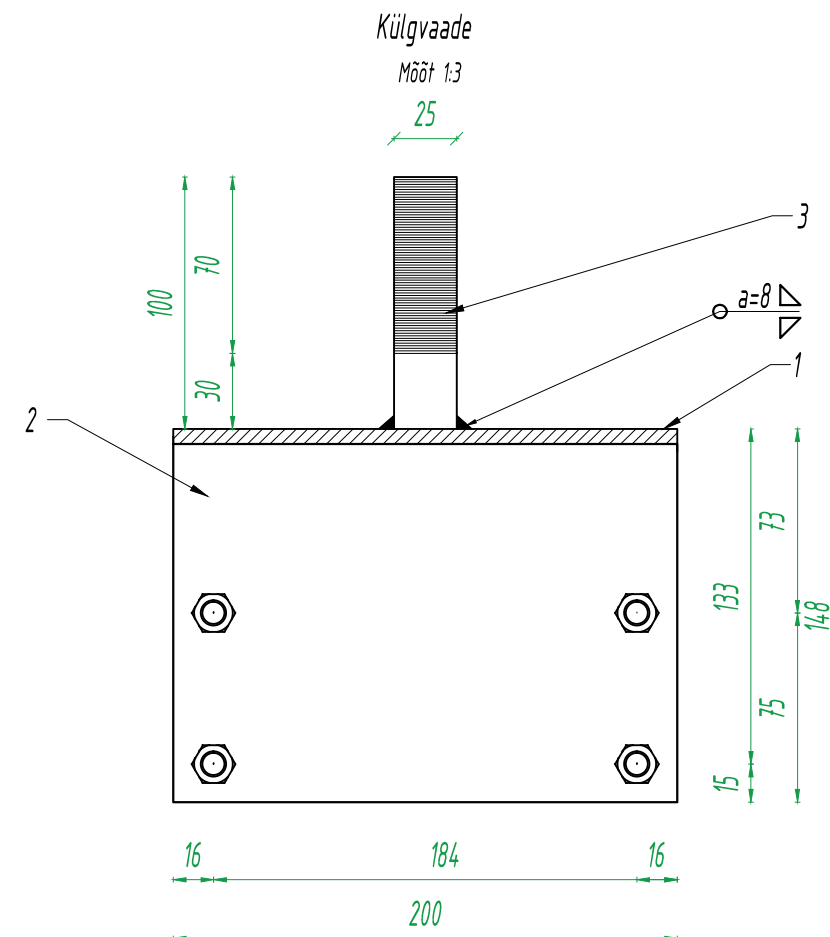
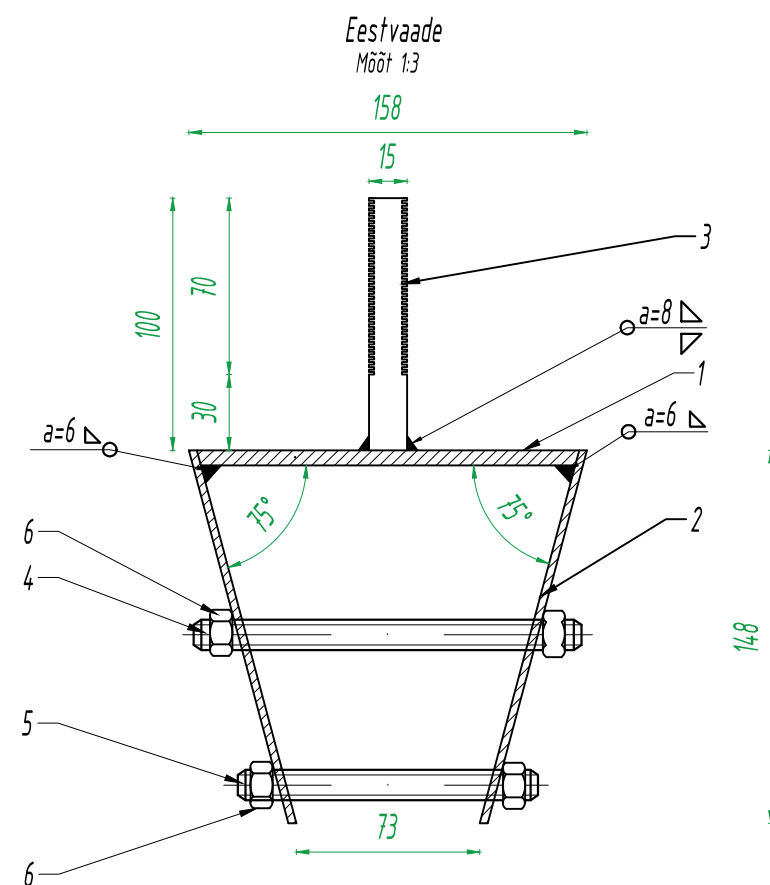



Fig. 3.3. Bond strength development when using hooked ends in case of embedded length = 0.3 L.

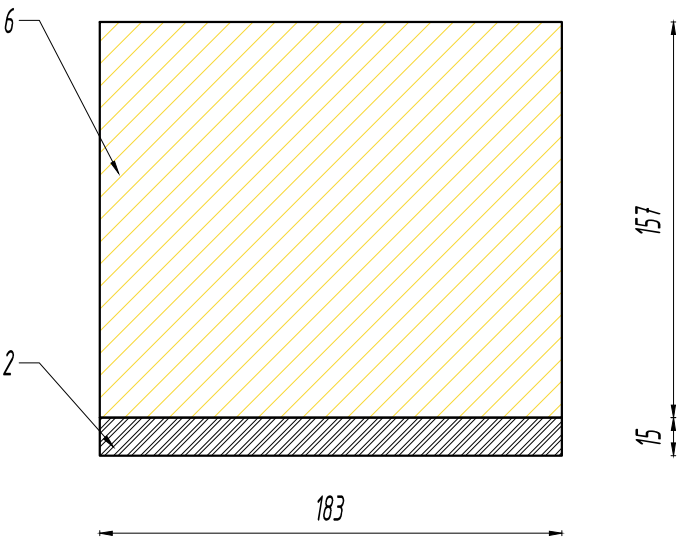


Märkused:

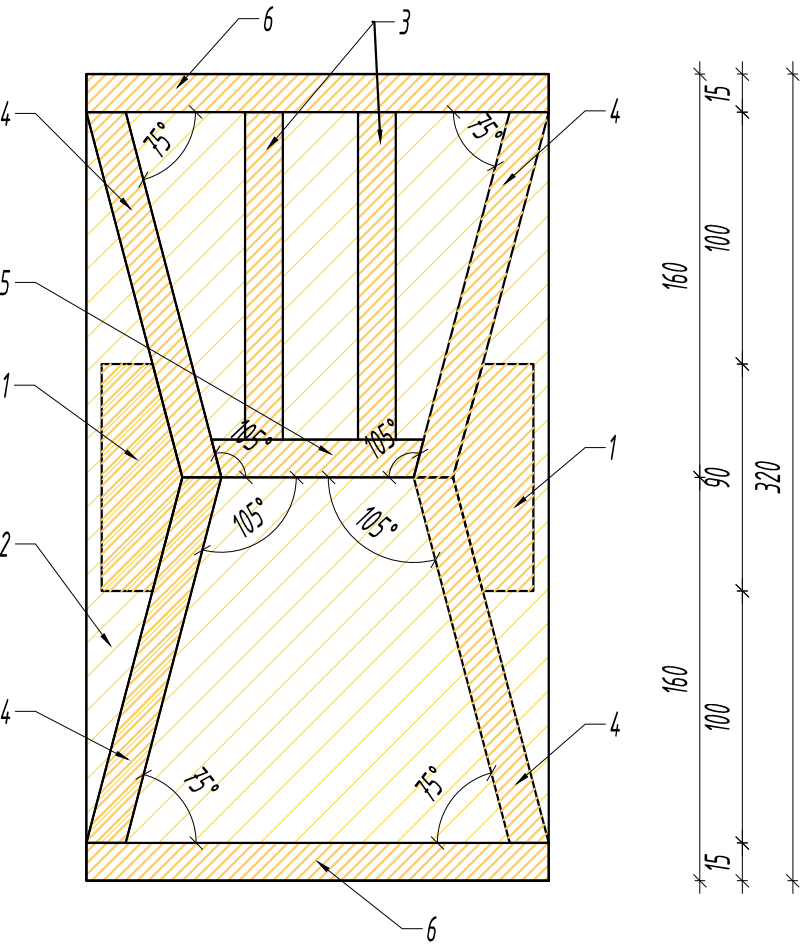
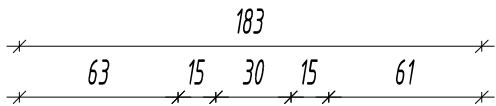
- * Pos 3 - Masina lülge kinnitavas osas 70 mm ulatuses joonisel näidatud küljed rifeldafda.
* Pos 1 ja pos 2 keevistliidete pikkused teostada terve haaratsi ulatuses.

1	Terasplaat 6mm, S235	1	
2	Terasplaat 3mm, S235	2	
3	Teraspost S235	1	
4	Keermelatt M12, KZN, 145mm	2	
5	Keermelatt M12, KZN, 120mm	2	
6	Mutter M12, KZN	4	
Tähis	Nimetus		Hulk Märkus
Joonestas	üliõp. Tauno Truuts	Nimetus: Proovikeha haaratsi tootejoonis	
Kontrollis	dots. Alexander Ryabchikov		
Kinnitas	dots. Alexander Ryabchikov		
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehituse instituut Institute of Forestry and Rural Engineering		Leht: 1/1	Tähis: MI 18 100786 1

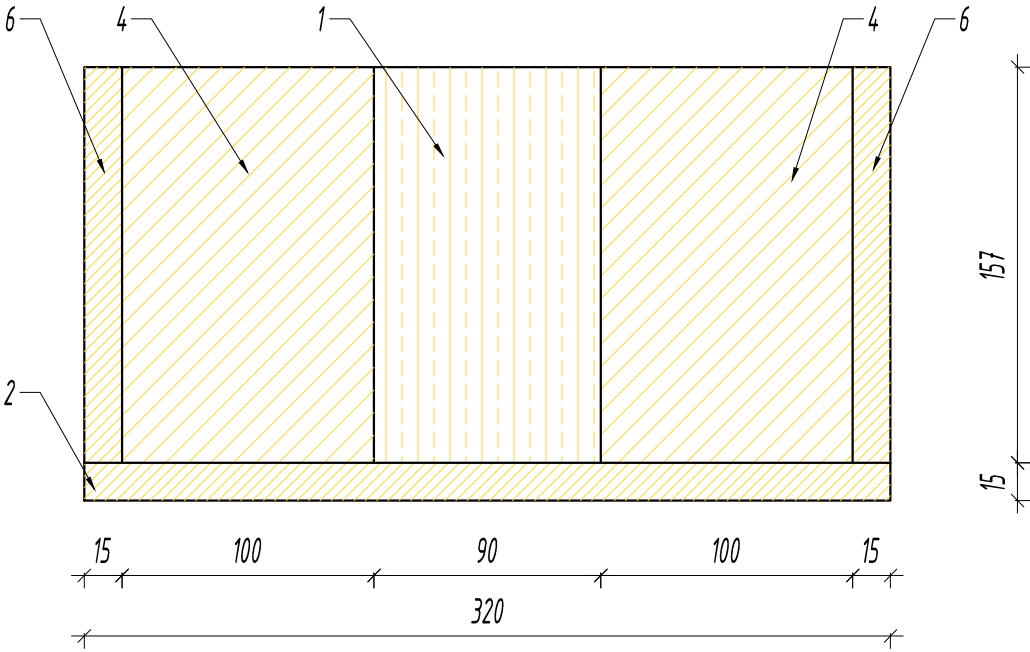
Eestvaade
Mõõt 1:3




Pealtvaade
Mõõt 1:3

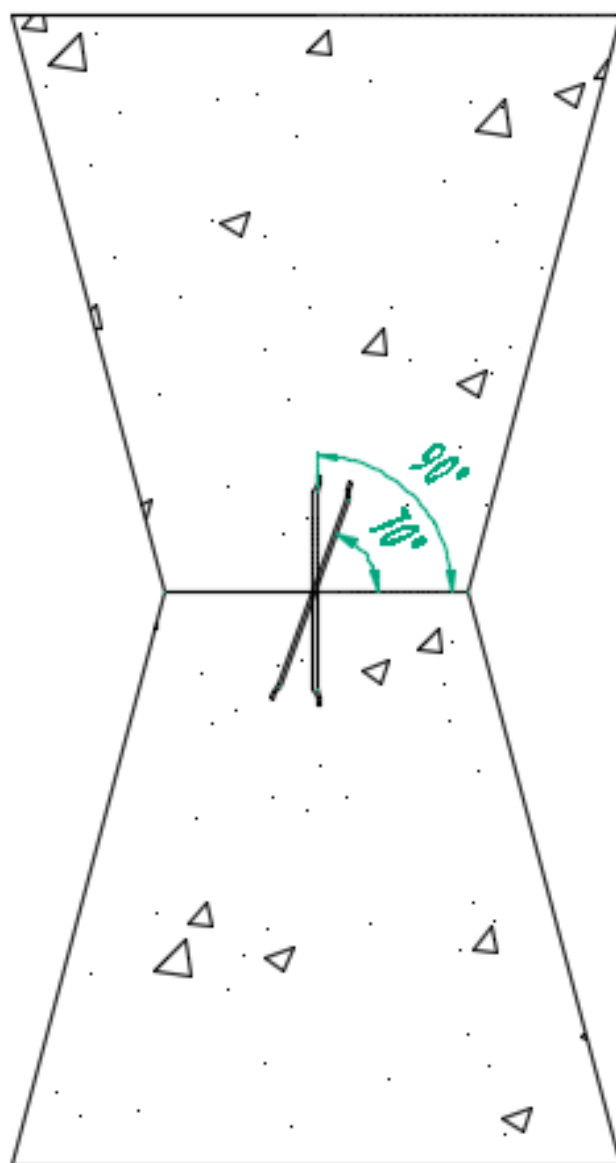


Külgvaade
Mõõt 1:3



1	Tugipost (liimpuit 32x90x142 mm)		2	
2	Alusplaat (lamineeritud kasevineer 15x183x320 mm)		1	
3	Toetusplaadid (lamineeritud kasevineer 15x65x100 mm)		2	
4	Servaplaadid (lamineeritud kasevineer 15x142x154 mm)		4	
5	Keskmine otsaplaat (lamineeritud kasevineer 15x84x142 mm)		1	
6	Otsaplaadid (lamineeritud kasevineer15x183x142 mm)		2	
Tähis	Nimetus		Hulk	Märkus
Joonestas	üliõp. Tauno Truuts	Proovikeha vormi tootejoonis		
Kontrollis	dots. Alexander Ryabchikov			
Kinnitas	dots. Alexander Ryabchikov			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering		Leht: 1/1	Tähis: MI 18 100786 1	

Lisa 4. Teraskiu asetuse skeem betoonis



Lisa 5. Teraskiu XP 75/62 katsete tulemused

Seeria	Betooni tugevusklass (MPa)	Teraskiu asetuse nurk (α°)	Väljatõmbejõud (N)	Väljatõmbejõu aritmeetiline keskmine (N)	Siire (mm)
I	C25/30	90	311,77	$237,552 \pm 10$	1,4382
			321		1,48176
			198,85		0,82004
			163,04		0,57891
			293,42		-0,37409
			284,95		5,14727
			267,46		0,28766
			238,02		0,88517
			130,37		3,03028
			166,64		3,58296
II	C35/45	90	444,03	$479,287 \pm 10$	0,13532
			477,07		1,50894
			479,57		6,72598
			529,76		3,1097
			482,81		2,20142
			513,69		1,6305
			411,74		-0,82735
			575,08		1,86913
			518,17		2,0248
			360,95		-0,27564
III	C25/30	70	385,92	$417,526 \pm 10$	1,59973
			400,27		6,50766
			551,83		4,13356
			342,81		1,67071
			415,56		2,32859
			479,39		5,81196
			350,14		3,45707
			434,35		3,87113
			370,56		4,23046
			444,43		3,41152
IV	C35/45	70	522,61	$469,806 \pm 10$	2,3398
			540,33		5,13987
			332,88		4,46483
			475,06		5,67695
			547,18		5,56991
			381,13		4,01825
			605,69		6,08735
			480,18		0,90516
			343,2		2,94221

Lisa 6. Teraskiu HE 75/52 katsete tulemused

Seeria	Betooni tugevusklass (MPa)	Teraskiu asetuse nurk betoonis (α°)	Väljatõmbejõud (N)	Väljatõmbejõu aritmeetiline keskmine (N)	Siire (mm)
I	C25/30	90	394,74	223,584 ± 10	2,56679
			198,4		0,12881
			158,17		0,62893
			312,46		0,41245
			218,52		0,55928
			133,08		0,062
			244,07		0,10985
			219,62		10,99229
			251,17		0,74734
			105,61		1,36043
II	C35/45	90	284,82	258,829 ± 10	2,31695
			443,64		-0,21773
			385,61		2,16387
			238,06		0,65111
			168,88		-0,01312
			188,6		3,84438
			179,74		1,39486
			274,73		2,36403
			245,06		2,97509
			179,15		1,04566
III	C25/30	70	157,48	177,427 ± 10	0,58624
			183,24		2,02691
			178,2		4,51679
			256,79		2,45282
			265,79		1,53157
			197		4,93866
			112,33		1,85847
			167,53		1,01155
			116,68		1,79742
			139,23		1,6187
IV	C35/45	70	186,58	254,057 ± 10	2,57128
			289,5		10,02846
			290,15		2,39343
			360,98		3,52395
			201,86		2,19137
			187,43		1,42675
			282,35		4,3664
			170,91		4,36966
			268,77		4,59998
			302,04		7,64854

Lisa 7. Regressioonianalüüs

SUMMARY OUTPUT

<u>Regression Statistics</u>	
<u>Multiple R</u>	0,680342595
<u>R Square</u>	0,462866046
<u>Adjusted R Square</u>	0,44166339
<u>Standard Error</u>	102,2627001
<u>Observations</u>	80

ANOVA

	<u>df</u>	<u>SS</u>	<u>MS</u>	<u>F</u>	<u>Significance F</u>
<u>Regression</u>	3	684889,994	228296,6648	21,830569	2,68403E-10
<u>Residual</u>	76	794782,148	10457,65984		
<u>Total</u>	79	1479672,14			

	<u>Coefficients</u>	<u>Standard Error</u>	<u>t Stat</u>	<u>P-value</u>	<u>Lower 95%</u>	<u>Upper 95%</u>	<u>Lower 95,0%</u>
<u>Intercept</u>	-661,6812623	162,861598	-4,06284397	0,0001169	-986,048247	-337,314278	-986,0482467
<u>Betooni tugevus</u>	2,541855524	0,64778003	3,923948599	0,0001897	1,25168979	3,832021258	1,25168979
<u>Teraskiu asetused</u>	-0,9073	1,14333175	0,793557954	0,4299235	-3,18444252	1,369842521	-3,184442521
<u>Teraskiud</u>	16,08235	2,28666349	7,033107437	7,606E-10	11,52806496	20,63663504	11,52806496

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning
juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Tauno Truuts,
sünniaeg 15.10.1989,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Teraskiu ja betooni vahelise nakketugevuse uurimine,
mille juhendaja(d) on Alexander Ryabchikov

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
- kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 - 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 16.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)